

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

“INNOVACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA OPERACIÓN DE EMBALSES PARA RIEGO”

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

Tesis previa a la obtención
del título de Ingeniero Civil

Autor:

Pedro José Cordero Delgado

Director:

Ing. José Vicente Tinoco Ochoa MSc.

Cuenca - Ecuador
2015

Resumen

En lugares de condiciones hidrometeorológicas extremas, tales como inundaciones y sequías, es necesario construir embalses para erradicar estos problemas, atenuando las crecientes de los ríos en la época lluviosa y principalmente durante la época seca almacenando agua para la distribución. El volumen del embalse se calcula con los requerimientos de riego de los cultivos. El objetivo de este estudio es desarrollar un modelo matemático que optimice la dosificación de agua, distribuyendo el recurso según los requerimientos del cultivo y las precipitaciones de los 10 días precedentes. Los requerimientos de riego se obtienen mediante una simulación de los cultivos. Los resultados obtenidos de la simulación y las precipitaciones son agrupados en periodos de 10 días y son sometidos a un análisis de frecuencia para determinar los umbrales para un escenario seco, normal o lluvioso, que definen las directrices de operación del modelo. Se realiza un análisis del flujo con un modelo de tránsito agregado de crecientes para condiciones climáticas secas y con el modelo de operación desarrollado. En los dos casos se simula el comportamiento del flujo del embalse según los afluentes y efluentes del mismo a lo largo de una serie histórica de 21 años de datos diarios, desde 1985 a 2006. Los resultados de la simulación con el modelo desarrollado mostraron que la demanda de riego se abastece utilizando menos volumen de agua que la simulación para condiciones secas. El estudio concluye que se abastece el riego planificado optimizando el uso del agua y se garantiza caudal ecológico.

Palabras clave: riego, escenarios, modelación de embalses, operación de embalses.

Abstract

At locations where the weather conditions are critical, such as floods and droughts it is necessary to build reservoirs to eradicate these problems. In the current study they are used for attenuating high peak flow events in the rainy season and mainly for storing irrigation water for its further distribution in the drought season. The reservoir storage is designed based on the crop irrigation requirements. The aim of this research is to develop a mathematical model that optimizes the water dosage and distributes the water resource according the crop irrigation requirements and the precedent 10-day rainfall. The irrigation requirements are acquired from a daily crop simulation. The crop simulation results and the daily rainfall are clustered in 10-day periods. A frequency analysis is preformed to the 10-day rainfall and irrigation data series, to obtain thresholds for dry, normal and wet conditions. These thresholds define the operation model guidelines. A flow analysis through the reservoir is carried out by a reservoir routing model for dry conditions and using the operation model developed. Both cases simulate the flow behavior through the reservoir according to the reservoir inflows and outflows along a 21-year daily data series, since 1985 to 2006. The results show that the developed model uses less water volume to supply the irrigation than the dry conditions simulation. The research concludes with the supplying of the irrigation target planned using water in a optimized way and ensuring the ecological flow downstream the reservoir.

Keywords: irrigation, stages, reservoir routing, reservoir operation.

Índice general

Resumen	2
Abstract	3
Índice general	4
Índice de figuras.	6
Índice de tablas.	8
1. Introducción	13
1.1. Objetivos del estudio	14
1.1.1. Objetivos generales	14
1.1.2. Objetivos específicos	14
2. Materiales para el desarrollo del estudio	15
2.1. Caso de estudio	15
2.2. Información utilizada en el estudio	16
2.2.1. Información geográfica	16
2.2.2. Información hidrometeorológica	17
2.2.3. Información de los suelos del caso de estudio	18
2.2.4. Información de los cultivos	19
3. Metodología del estudio	21
3.1. Simulación de cultivos	21
3.1.1. Procedimientos de cálculo del modelo AquaCrop	22
3.1.2. Archivos necesarios para la simulación en AquaCrop	23
3.1.3. Simulaciones en AquaCrop y sus resultados	26
3.2. Análisis de frecuencia para la creación de calendarios de riego	27
3.2.1. Agrupación de datos diarios en décadas	27
3.2.2. Conceptualización del análisis de frecuencia en la metodología	27
3.2.3. Preparación de información	28
3.2.4. Aplicación del análisis de frecuencia	29
3.2.5. Procesamiento de las matrices de requerimiento de riego neto	30
3.2.6. Calendarios de riego	30
3.3. Desarrollo del modelo de predicción y distribución de riego (MPDR)	31
3.3.1. Lógica del modelo MPDR	31
3.3.2. Conceptualización del modelo MPDR en el caso de estudio	32
3.4. Modelación de embalses	33



3.4.1.	Representación matemática de la simulación de embalses	33
3.4.2.	Diseño del volumen del embalse	34
3.4.3.	Preparación de información para la modelación	36
3.4.4.	Reglas de operación para el embalse de Mocache	36
3.4.5.	Ingreso de datos al modelo de simulación del flujo en embalses	37
3.4.6.	Datos de salida y procesamiento de datos	38
4.	Resultados y Discusión	40
4.1.	Resultados de la simulación de los cultivos	40
4.1.1.	Comportamiento del maíz en invierno	40
4.1.2.	Comportamiento del maíz y soya en verano	42
4.1.3.	Comportamiento anual y de la rotación	43
4.2.	Resultados del análisis de frecuencia	44
4.2.1.	Precipitación según su probabilidad de excedencia	44
4.3.	Resultados de la modelación de embalses con el modelo MPDR . .	46
4.3.1.	Comportamiento anual del embalse	46
4.3.2.	Abastecimiento de riego	48
4.3.3.	Caudal Ecológico	50
5.	Conclusiones	51
5.1.	Limitaciones del estudio	52
5.2.	Próximas investigaciones según los resultados obtenidos	53
	Bibliografía.	54
	A. Figuras de Resultados	57

Índice de figuras.

2.1. Ubicación del caso de estudio.	15
2.2. Área de riego y uso de suelo.	17
2.3. Área de riego y tipos de suelo.	19
3.1. Esquema de la metodología del estudio.	21
3.2. Desarrollo del cultivo a través de sus etapas	22
3.3. Niveles de operación y volúmenes almacenados	35
3.4. Zonas establecidas para la operación del embalse	37
4.1. Cosecha anual del maíz de invierno.	41
4.2. Transpiración del maíz de invierno.	41
4.3. Productividad del agua según la cosecha del maíz en invierno.	42
4.4. Cosecha anual del maíz de verano.	42
4.5. Transpiración del maíz de verano.	43
4.6. Productividad del agua según la cosecha del maíz en verano.	43
4.7. Calendario de riego para maíz.	45
4.8. Calendario de riego para soya.	45
4.9. Requerimiento de riego y precipitaciones.	46
4.10. Niveles medios diarios de agua en el embalse.	47
4.11. Desglosamiento de caudales de entrada y salida del embalse.	47
4.12. Evaporación del embalse de Mocache.	48
4.13. Simulación con el modelo MPDR.	49
4.14. Simulación para condiciones secas.	49
4.15. Volumen anual de riego.	49
4.16. Caudal ecológico medio diario.	50
A.1. Curvas Cota-Área-Volumen del embalse de Mocache.	57
A.2. Cosecha anual de la soya de verano.	58
A.3. Transpiración de la soya de verano.	58
A.4. Productividad del agua según la cosecha de la soya de verano.	58
A.5. Cosecha por año rotación.	59
A.6. Transpiración por año rotación.	59
A.7. Productividad del agua según la cosecha por año rotación.	59
A.8. Cosecha anual por rotación.	60
A.9. Transpiración por rotación.	60



A.10.Productividad del agua según la cosecha por rotación.	60
A.11.Precipitaciones para un escenario húmedo, normal y seco.	61
A.12.Caudal ecológico medio diario en verano.	62



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

Índice de tablas.

2.1. Caudales del Río Mocache.	16
2.2. Descripción de la leyenda de la Figura 2.2	18
2.3. Propiedades hidráulicas de los suelos.	18
2.4. Textura de los suelos de Mocache.	19
2.5. Características del Maíz y Soya.	20
3.1. Escenarios y sus probabilidades de excedencia	28
3.2. Matriz de precipitaciones agrupadas en décadas.	29
3.3. Matriz de Probabilidades de Excedencia de la Precipitación.	29
3.4. Eficiencias del Sistema de Riego - Fuente: (PROMAS, 2014)	30

UNIVERSIDAD DE COLOMBIA
desde 1867

Yo, *Pedro José Cordero Delgado*, autor de la tesis *Innovación de Estrategias para Operación de Embalses para Riego*, certifico que todas las ideas, opiniones, y contenidos expuestos en la presente investigación, son de mi exclusiva responsabilidad.

Cuenca, Octubre 2015.



Pedro José Cordero Delgado
C.I. 010418039-3

Yo, *Pedro José Cordero Delgado*, autor de la tesis *Innovación de Estrategias para Operación de Embalses para Riego*, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de *Ingeniero Civil*. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Octubre 2015.



Pedro José Cordero Delgado
C.I. 010418039-3

Agradecimientos

El desarrollo de esta tesis fue posible gracias a todo el personal del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS - Universidad de Cuenca, en especial, al Ing. Pedro Cisneros MSc. por su colaboración y apoyo en la parte agronómica del proyecto, a mi Director el Ing. Vicente Tinoco MSc. por su asesoría en el transcurso de esta tesis y su amabilidad para compartir su conocimiento.

Agradezco a mi familia por ser mi ejemplo a seguir y por su apoyo incondicional en la finalización de esta etapa de mi vida.

Agradezco a mis amigos y compañeros de estudio por acompañarme durante todos los años de sacrificio y estudio para poder cumplir esta meta.

Quiero agradecer también a todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Civil quienes con su conocimiento me han proporcionado la mejor formación académica y moral para poder obtener el título de Ingeniero Civil. Un agradecimiento especial para el Ing. Esteban Pacheco MSc. por haberme aconsejado y ayudado en el transcurso de la carrera universitaria para que sea posible el cumplimiento de esta gran meta.

Dedicatoria

Este trabajo es dedicado a mis padres Bernardo y María del Carmen, y a mis hermanos David, Andrés y Pablo por haberme acompañado y guiado por el camino correcto.

Pedro José Cordero Delgado.



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

Capítulo 1

Introducción

La actividad agrícola demanda la mayor cantidad de agua dulce del mundo (Reca et al., 2015), por esta razón el uso sostenible del agua es una prioridad en los proyectos de riego.

La provincia de Los Ríos se destaca por la actividad agrícola, donde aproximadamente el 80 % del uso de suelo está destinado a actividades de esta índole (Prefectura de Los Ríos, 2012). Se puede resaltar que en Los Ríos existe la mayor producción de banano y maíz duro seco del Ecuador (INEC, 2013). La siembra de los cultivos se realiza en la época lluviosa del año, diciembre a mayo, debido a que la mayoría de las precipitaciones ocurren durante este período. En la época seca, la agricultura se restringe en las zonas que no cuentan con agua para riego, limitando la producción agrícola a una siembra por año. A partir de esta necesidad surge el Proyecto de Aprovechamiento y Control del Agua de la Provincia de Los Ríos (PACALORI).

El agua es un recurso indispensable para el desarrollo económico de la zona que abarca el proyecto PACALORI, ya que alrededor del 80 % de la población depende de la actividad agrícola (INEC, 2010) que representa el 44 % de la economía de la provincia (Prefectura de Los Ríos, 2012). La finalidad de este proyecto es el control de inundaciones en la época de invierno para disminuir el riesgo de pérdidas productivas, y el almacenamiento de agua en la época de verano. El agua almacenada será utilizada para el riego de cultivos y de esta manera aumentar la producción agrícola de la provincia. La distribución de agua en el verano se realiza mediante la operación de embalses, definiendo así la manera en la que se repartirá el recurso en las diferentes épocas del año. La operación de embalses debe considerar el cálculo óptimo de los caudales necesarios, de tal manera que se pueda aprovechar eficientemente el volumen de los embalses que proveen de riego a la zona de estudio.



En estudios anteriores, la operación de embalses ha considerado condiciones meteorológicas críticas durante el periodo de modelación. Estas condiciones se refieren a un escenario donde las precipitaciones utilizadas en el cálculo de los caudales de riego tienen un 80 % de excedencia, que garantiza la presencia de precipitaciones bajas durante el año considerado. Se ha encontrado que estas precipitaciones no han sido suficientes para satisfacer la demanda de riego de la zona proyectada, debido a que los caudales de riego están calculados según las necesidades mensuales de los cultivos (Tinoco, 2014). En otro estudio realizado por (Celi Contreras y Vélez Arcentales, 2013), el balance hídrico realizado en el embalse considera un caudal de riego ficticio continuo estimado para todo el ciclo de simulación, el cual no es muy representativo ya que en ciertas épocas no se riega lo que los cultivos requieren.

1.1. Objetivos del estudio

1.1.1. Objetivos generales

Desarrollar un modelo matemático de predicción y distribución de riego y aplicarlo en la simulación del flujo a través de embalses para optimizar la operación de los mismos.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar el requerimiento de riego de los cultivos mediante el modelamiento de éstos para las condiciones de clima, suelo y manejo de campo de la zona.
- Realizar análisis de frecuencias de las series históricas de datos de precipitaciones y de los resultados de las simulaciones de riego, para obtener calendarios de referencia de riego a lo largo del año para diferentes condiciones de lluvia.
- Establecer estrategias para el manejo del embalse del caso de estudio para optimizar el uso del agua y garantizar el caudal ecológico aguas abajo de la represa.

Capítulo 2

Materiales para el desarrollo del estudio

2.1. Caso de estudio

El caso de estudio es uno de los trece embalses para riego planificados por el proyecto PACALORI, el embalse se proyectará en la cuenca del Río Mocache que se encuentra en la provincia de Los Ríos – Ecuador. El área de la cuenca hidrológica del Río Mocache que aporta al embalse tiene una extensión de 26 Km^2 ; al ser una cuenca pequeña la escorrentía genera caudales pequeños y se presentan en la Tabla 2.1. El área de riego planificada que abastece el embalse de Mocache es de 3079 ha.

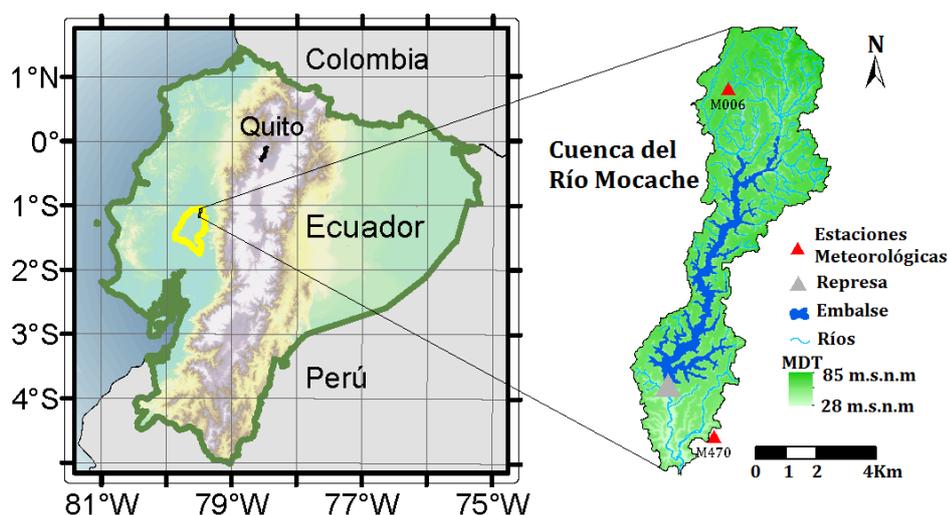


Figura 2.1: Ubicación del caso de estudio.

Las temperaturas oscilan entre 17 a 35°C considerándose como una de las zonas con mayor temperatura del país (PROMAS, 2014b). La zona de estudio presenta una de las precipitaciones anuales más grandes del Ecuador con un valor de 2000



Tabla 2.1: Caudales del Río Mocache.

Descripción	Valor m^3/s
Caudal máximo mensual	10
Caudal mínimo mensual	0.027
Caudal medio-periodo lluvioso	2.1
Caudal medio-periodo seco	0.40

mm anuales. Las precipitaciones tienen una distribución variable y desbalanceada con respecto al volumen precipitado y al tiempo, de tal manera que el 80 % de las lluvias se dan de enero a mayo (época de invierno) y el 20 % en los 7 meses siguientes (época de verano) (Tinoco, 2014).

En el cantón Mocache el 67.2 % de la población económicamente activa se dedica a la agricultura, ganadería, silvicultura y pesca (INEC, 2010, 2012). Esta información es muy importante ya que el objetivo principal del proyecto PACALORI es administrar de la mejor manera los recursos hídricos de tal manera que las siembras en el año no sean dependientes de la precipitación de la época lluviosa y se pueda realizar una segunda siembra en la época seca del año. De esta manera habrá un incremento significativo en los ingresos económicos de la población que se dedica a este tipo de actividades.

2.2. Información utilizada en el estudio

La información que se requirió para el desarrollo del este estudio fue proporcionada por el Programa de Manejo de Agua y Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca, encargado del diseño del proyecto PACALORI.

2.2.1. Información geográfica

La cartografía base y temática fue proporcionada por el Departamento de Geomática del PROMAS; la información necesaria para el estudio fue: cuencas hidrográficas, ríos, ubicación de los embalses, estaciones meteorológicas, áreas de riego y uso de suelo. Toda esta información fue manejada mediante un sistema de información geográfica (SIG). Para la modelación de embalses se requirió las curvas Cota-Área-Volumen que se representan en la Figura A.1.

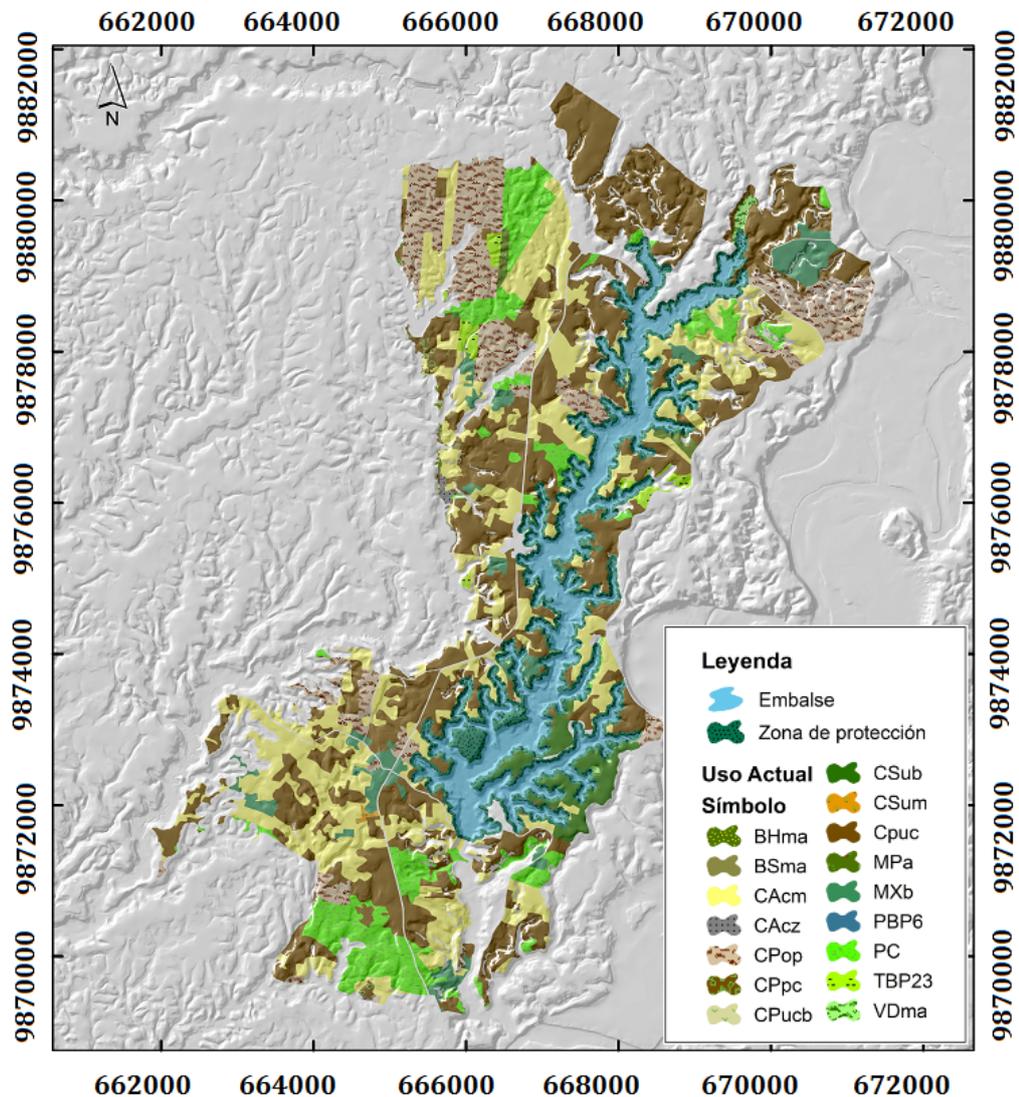


Figura 2.2: Área de riego y uso de suelo.

2.2.2. Información hidrometeorológica

La información de temperaturas máximas y mínimas fue recolectada de la estación Pichilingue M006. Los datos de precipitación se han recolectado de las estaciones Mocache y Pichilingue, y distribuido en la subcuenca del Río Mocache. Los datos de escorrentía del Río Mocache se han generado mediante un modelo hidrológico de escala diaria (PROMAS, 2013). Los datos de evapotranspiración de referencia fueron proporcionados por el PROMAS. La información recolectada y facilitada son series históricas de datos diarios, desde agosto de 1984 hasta diciembre de 2006.

Tabla 2.2: Descripción de la leyenda de la Figura 2.2

Símbolo	Cobertura	Superficie (Ha)
BHma	Bosque húmedo muy alterado	2.75
BSma	Bosque seco muy alterado	0.78
CACm	Maíz	838.49
CACz	Arroz	5.88
CPop	Palma Africana	384.35
CPpc	Policultivo Perenne	12.28
Cpuc	Cacao	1242.14
CPucb	Banano-Cacao	0.97
CSub	Banano	70.78
Csum	Maracuya	2.74
MPa	Pasto cultivado con presencia de arboles	15.39
MXb	Miscelaneo indiferenciado	134.66
PC	Pasto cultivado	326.4
TBP23	Teca	32.18
VDma	Vegetación herbácea de humedal muy alterada	9.43
TOTAL		3079.2

2.2.3. Información de los suelos del caso de estudio

Esta información es necesaria para la modelación o simulación dinámica de los cultivos, entre los datos utilizados se tiene lo siguiente: tipo de suelo, capacidad de campo (**FC**), punto de marchitez permanente (**PMP**), saturación, humedad aprovechable (**TAW**), textura del suelo y conductividad hidráulica (K_s) (PRO-MAS, 2014a), y se presentan en las Tablas 2.3 y 2.4.

Tabla 2.3: Propiedades hidráulicas de los suelos.

Tipo de Suelo	FC (%)	PMP (%)	TAW (%)	K_s (cm/h)
Alfisol	45.82	28.28	17.53	4.64
Andisol	33.83	19.61	14.22	9.14
Inceptisol	45.99	29.11	16.88	1.65
Mollisol	46.95	25.42	21.53	5.49

Los suelos de Mocache según su textura se clasificaron como suelos Franco Arcillosos. La clasificación se realizó según la composición granulométrica y se utilizó el triángulo de texturas (Verplancke, 1995).

Tabla 2.4: Textura de los suelos de Mocache.

Tipo de Suelo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla(%)
Alfisol	23.95	38.25	37.80
Andisol	28.00	36.67	35.33
Inceptisol	23.15	36.45	40.40
Mollisol	28.92	38.95	31.49

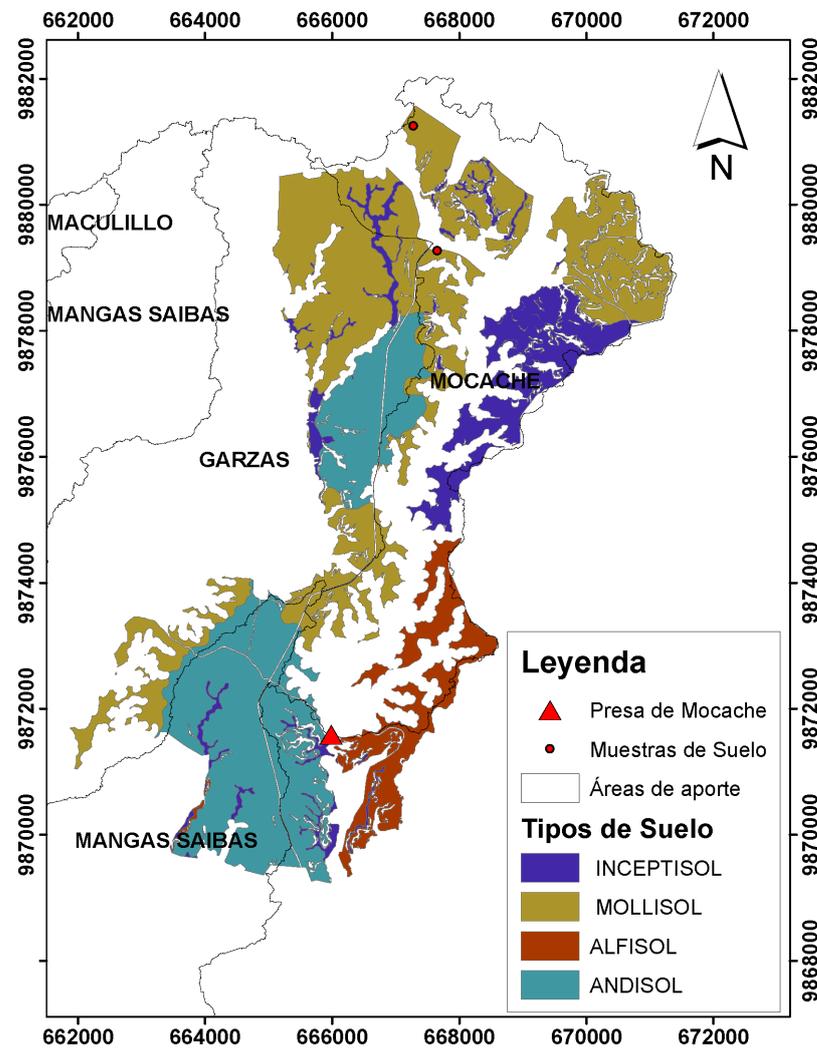


Figura 2.3: Área de riego y tipos de suelo.

2.2.4. Información de los cultivos

Las características de los cultivos son indispensables para el cálculo de los requerimientos hídricos de los mismos. Los cultivos utilizados son el maíz y la



soya, y la información necesaria fue la siguiente: densidad de plantación, etapas de desarrollo de los diferentes cultivos, profundidad máxima de las raíces y cobertura de follaje máximo (PROMAS, 2014a; Steduto et al., 2012; Molina, 2010; Lara Ledesma, 2009; Raes et al., 2009b); estas características se presentan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Características del Maíz y Soya.

Etapas de desarrollo	Maíz (días)	Soya (días)
Emergencia	6	6
Follaje máximo	54	55
Enraizamiento máximo	86	70
Inicio de senectud	107	80
Madurez	132	105
Inicio de floración	51	45
Desarrollo de índice de cosecha	34	56
Duración de floración	20	20
Densidad de plantación (<i>plantas/ha</i>)	75000	330000
Follaje máximo	99 %	95 %

La fecha de siembra en invierno es el 20 de diciembre y la fecha de siembra en verano es el 1 de junio, entre cada siembra se deja un lapso de tiempo para la preparación del suelo (PROMAS, 2014a).

Capítulo 3

Metodología del estudio

La metodología que se va a seguir para el desarrollo de este estudio se representa mediante la Figura 3.1, que se presenta a continuación:

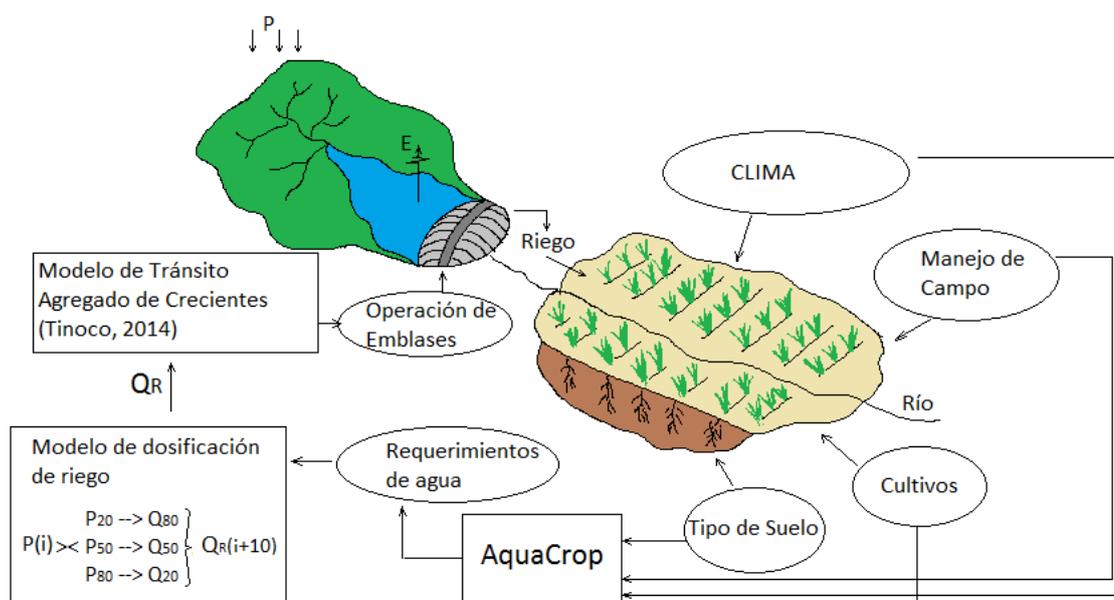


Figura 3.1: Esquema de la metodología del estudio.

3.1. Simulación de cultivos

En los recursos hídricos se trata de optimizar al máximo la administración del agua, abasteciendo las necesidades y evitando pérdidas del recurso, por esta razón, la modelación de los cultivos tiene gran relevancia en la metodología de este estudio. La simulación de los cultivos se realizó con el modelo matemático

AquaCrop. La simulación tiene como objetivo determinar el requerimiento de riego neto del maíz y soya para la obtener la mayor cosecha posible.

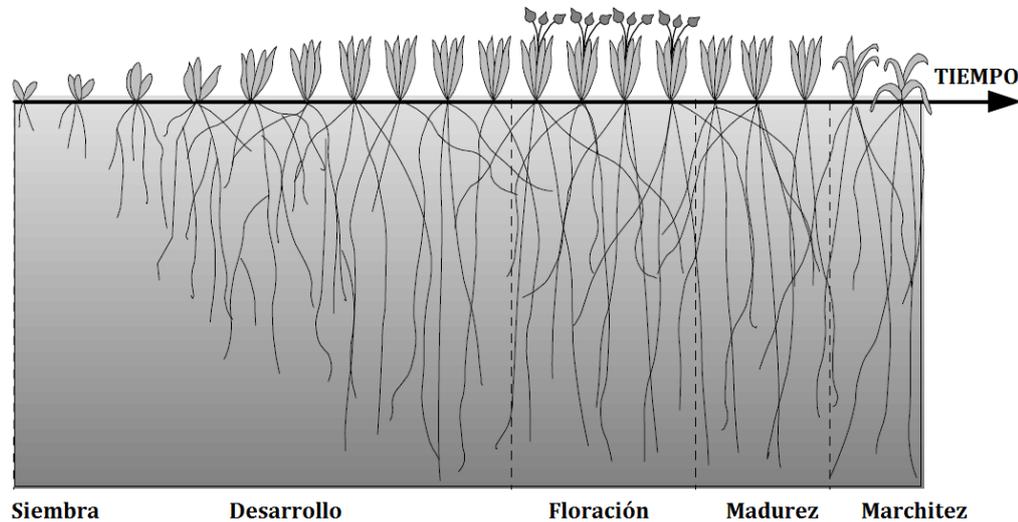


Figura 3.2: Desarrollo del cultivo a través de sus etapas - *Adaptado de: (Raes et al., 2009a).*

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

3.1.1. Procedimientos de cálculo del modelo AquaCrop

Para realizar la simulación del cultivo se debe conocer los siguientes parámetros que interviene en el calculo de la cosecha del cultivo. El desarrollo del cultivo se expresa a través de un indicador llamado *Cobertura de Follaje (CC)* que expresa la fracción de suelo cubierta por el follaje del cultivo (Steduto et al., 2009). La cobertura de follaje sirve para calcular la *Evaporación de Suelo (E)* y la *Transpiración del Cultivo (Tr)*, estos parámetros sirven para calcular la evapotranspiración del cultivo, donde (*E*) predomina en la etapa inicial del cultivo y (*Tr*) desde el desarrollo hasta la marchitez. Para cada cultivo se ha determinado experimentalmente una variable denominada *Productividad del Agua (WP*)* que se define como la cantidad de materia seca en *kg* producida por unidad de superficie por unidad de agua transpirada (Raes et al., 2009b,a). Los parámetros descritos anteriormente sirven para calcular la *Biomasa (B)*, que es la cantidad total de materia seca producido por el cultivo a lo largo de su ciclo de vida.

$$B = K_{sb} \times WP^* \times \sum \frac{Tr}{ET_o} \quad (3.1)$$

Donde,



- B : Biomasa
 K_{sb} : Coeficiente de estrés por temperatura del aire
 WP^* : Productividad del Agua Normalizada
 Tr : Transpiración del Cultivo
 ET_o : Evapotranspiración de Referencia

La producción o cosecha de un cultivo se expresa como el producto de la Biomasa por el *Indice de Cosecha* (HI_o) y por un *factor de ajuste* f_{HI} . El Índice de Cosecha es la porción de biomasa que se destina para la producción de frutos en condiciones óptimas de riego, en estas condiciones $f_{HI} = 1$ pero si existen condiciones de estrés este factor es menor que 1, disminuyendo el índice de cosecha.

$$Y = f_{HI} \times HI_o \times B \quad (3.2)$$

Donde,

- Y : Producción o Cosecha
 f_{HI} : Factor de ajuste por estrés hídrico
 HI_o : Índice de Cosecha sin efecto de estrés hídrico
 B : Biomasa

El parámetro f_{HI} afecta a la cosecha si existe algún tipo de estrés, pero dependiendo del momento en que se produzca alguno de los tipos de estrés, f_{HI} puede afectar de manera positiva o negativa a la cosecha. Existen otras etapas en el desarrollo del cultivo que pueden ser afectadas por estrés de tipo hídrico, por falta de aeración, por temperatura o por falta de fertilización. Estos tipos de estrés pueden afectar negativamente al desarrollo del cultivo con efectos como: cierre estomático, inhibición de polinización o senectud temprana, y positivamente con reducción del índice foliar (Raes et al., 2009a).

3.1.2. Archivos necesarios para la simulación en AquaCrop

Para simular con el modelo AquaCrop fue necesario que la información hidrometeorológica, características de suelo, características del cultivos y manejo de campo se organizó en archivos como se muestra a continuación:



Archivo de clima

Este archivo está compuesto por cuatro parámetros importantes, que en esencia son series de datos históricos de tipo diario de: *precipitación, temperatura máxima y mínima, concentración de CO₂ y evapotranspiración de referencia (ET_o)*. La evapotranspiración es muy importante ya que expresa el poder evaporativo de la atmósfera (Allen et al., 2006) e implícitamente da una representación del clima debido a que en su cálculo intervienen variables como:

- Radiación Solar
- Densidad de flujo de calor en el suelo
- Temperatura media diaria
- Velocidad del viento
- Presión de vapor de saturación
- Presión de vapor actual
- Déficit de presión de vapor para la saturación
- Pendiente de la curva de presión de vapor
- Constante psicrométrica

Archivo de cultivo

El modelo AquaCrop cuenta con una gran gama de propiedades de cultivos que solo pueden ser obtenidos a través de experimentación y monitoreo en laboratorios. Los cultivos que se pueden simular en AquaCrop son específicos para ciertas localidades y por esta razón deben ser modificados para el caso de estudio. Como se explicó en la Sección 2.2.4 la simulación de este trabajo únicamente se realizó para maíz y soya, y se modificó lo siguiente: *la fecha de siembra en invierno y verano, la duración del ciclo del cultivo, las etapas de desarrollo, la profundidad máxima de enraizamiento* y los cultivos se modelaron para condiciones ideales de fertilización; los parámetros restantes quedaron con sus valores por defecto (PROMAS, 2014a; Steduto et al., 2012).



Archivo de manejo de riego

En este campo se puede ingresar 3 tipos de condiciones de riego y pueden ser: generación de calendario de riego, ingreso de calendario de riego y requerimiento neto de riego. Para el caso de estudio, se estableció que el agotamiento de agua disponible de suelo (Readily Available Soil Water - RAW) debe ser del 30 %, de tal manera que la fracción de agotamiento permitida p no alcance los umbrales de cierre estomático y senectud temprana (Raes et al., 2009a). Un agotamiento de 30 % del RAW es similar a un 48 % del TAW para el maíz y un 49 % del TAW para la soya encontrándose entre los rangos permitidos (Jensen et al., 1980).

Archivo de manejo de campo

El manejo de campo se refiere a técnicas para conservación del suelo contra la erosión y pérdida de agua, para un mejor aprovechamiento del recurso hídrico. Estas técnicas consisten en la construcción de terrazas o diques de tierra para evitar que se pierda el agua lluvia y de riego por la escorrentía superficial. Otro método para la conservación del suelo que admite AquaCrop es la utilización de cobertores del suelo para evitar la pérdida de humedad por evapotranspiración. Los cobertores pueden ser sintéticos tales como plásticos, o también pueden ser residuos de materia orgánica producto de la caída de hojas de cultivos perennes (Raes et al., 2009a). Las condiciones de siembra de proyecto PACALORI no incluyen estas técnicas y los cultivos al ser de ciclo corto no presentan residuos orgánicos (PROMAS, 2014a), por lo tanto en este archivo no se ingresa información.

Archivo de tipo de suelo

En este archivo se describen los tipos de suelo que se pueden encontrar en el perfil del suelo analizado y sus respectivos espesores, estratos impermeables y la textura del suelo. Con respecto a las propiedades hidráulicas están los umbrales de capacidad de campo (FC), punto de marchitez permanente (PWP), agua total disponible (Total Available Water - TAW), contenido de agua del suelo en estado de saturación, conductividad hidráulica, capilaridad, agua fácilmente evaporable (Readily Evaporable Water - REW) y número de curva (NC). Los datos que se dejaron como valores por defecto fue REW y NC ya que se necesita mediciones y observaciones de campo.

Como se explicó en el Sección 2.2.3 en el área de riego de Mocache existen 4



tipos de suelos que presentan características hidráulicas y de textura similares. Para la simulación se asumió condiciones ideales de fertilización, donde, la fertilidad y riqueza de los suelos ya no era un parámetro decisivo en la selección del suelo de simulación. Por lo tanto, los suelos al presentar características hídricas y de textura similares se optó por escoger el suelo que ocupa mayor superficie y que se encuentra mejor distribuido en el área de riego. El suelo seleccionado para el desarrollo de este estudio fue el suelo **MOLLISOL**.

Archivo de agua subterránea

En esta sección se establece si el área de riego presenta aguas subterráneas o niveles freáticos, pero el proyecto PACALORI no dispone de esta información y no pudo ser establecida.

Archivo de agua condiciones iniciales

Las condiciones iniciales hace referencia al contenido de humedad inicial en el momento de la siembra, para este estudio se tomó como condición inicial el contenido de humedad se encuentra en FC , ya que para temperaturas entre 25° a $35^{\circ}C$ se y el contenido de humedad en FC da como resultado altos porcentajes de germinación (Yusuf, 1999).

La extensión del periodo de simulación esta definido por el archivo clima, pudiendo ser la precipitación, temperatura o evapotranspiración la que defina el extensión del periodo.

3.1.3. Simulaciones en AquaCrop y sus resultados

Con los archivos mencionados anteriormente se simuló el crecimiento de los cultivos a través de sus etapas de desarrollo definidas por el ciclo vegetativo. Las etapas de desarrollo son: siembra, fase vegetativa o desarrollo, floración, formación del fruto y maduración, y marchitez; todas estas etapas son funciones del tiempo.

Para este estudio se simuló el maíz y la soya, cada cultivo se modeló para una siembra en invierno y verano en el suelo Mollisol desde el año 1984 hasta el 2006, un periodo de 22 años. Una particularidad del modelo AquaCrop es que realiza una modelación por año, por lo tanto para cada cultivo se tienen 22 simulaciones en invierno y 22 simulaciones en verano, y al ser dos cultivos se tienen 88 simulaciones con sus respectivos resultados. Los resultados de la simulación



utilizados para el estudio son: requerimientos de riego neto, productividad del agua según la cosecha expresada como kg de cosecha producida por m^3 de agua evapotranspirada y la cosecha anual (ton/ha). Los requerimientos de riego neto se convierten en datos de entrada para el análisis de frecuencia que es el siguiente paso de la metodología de este estudio.

3.2. Análisis de frecuencia para la creación de calendarios de riego

Esta parte de la metodología del estudio es muy importante, porque es donde se crean las condiciones que definen las directrices de operación del modelo de predicción y distribución de riego que es el objetivo general de esta investigación.

3.2.1. Agrupación de datos diarios en décadas

Antes del análisis de frecuencia se realizó un proceso de agrupación de datos en periodos de 10 días o décadas, los datos agrupados fueron las series históricas de precipitación diaria y requerimiento de riego neto diario. La selección de periodos de 10 días para la agrupación de datos se justifica porque para el abastecimiento de agua para riego no se puede realizar con precipitaciones mensuales, debido a que el clima puede ser muy variable de una semana a otra resultando en una semana seca que puede perjudicar al desarrollo del cultivo (Raes, 2010). Con respecto a las necesidades de los cultivos, en el caso del maíz y la soya, admiten intervalos de riego de 6 a 24 días para el maíz y de 7 a 22 días para la soya (PROMAS, 2014a). Los intervalos de riego de 10 días se escogieron también por el sistema de aplicación del riego que se planificó en el proyecto PACALORI (aspersión), debido a que el montaje de los aspersores es muy laborioso y requieren mucho tiempo para ser colocados, por lo que se recomienda utilizar intervalos de tiempo mayores a los diarios debido a que es una carga económica innecesaria para los agricultores (Jensen et al., 1980).

3.2.2. Conceptualización del análisis de frecuencia en la metodología

La precipitación de una zona en un año determinado puede ser muy variable con respecto a otros años, por esta razón existen años secos, normales y húmedos



que pueden ser representados mediante una cantidad de precipitación anual. Una serie historia de datos de precipitación, se puede clasificar según los años por su precipitación anual. Un año se puede clasificar como un escenario seco, normal o húmedo si su precipitación media anual es igual o excede a un valor establecido por una probabilidad de excedencia.

Tabla 3.1: Escenarios y sus probabilidades de excedencia

Descripción	Valor
Seco	80 %
Normal	50 %
Húmedo	20 %

Análogamente se aplica este principio de los escenarios seco, normal y húmedo para a las series de datos de precipitación y requerimiento de riego neto agrupados en décadas, donde puede existir de la misma manera que los años, décadas para los escenarios mencionados. Para establecer las probabilidades de excedencia para dichos escenarios es necesario realizar una *análisis de frecuencia*. El proceso requiere que los datos sean ajustados a una curva de distribución de probabilidad de tal manera que los valores obtenidos para las probabilidades de excedencia requeridas no presenten errores y sean lo mas cercanos a la realidad. El ajuste a una curva de distribución de probabilidad tiene que cumplir con un grado de confianza para que los valores obtenidos del análisis sean los correctos, esto se alcanza cuando se tiene una gran serie de datos; mientras mayor sea la serie de datos analizada mejor será el ajuste, debido a que se tiene una mejor aproximación al comportamiento climático de la zona. El ajuste a una curva de distribución de probabilidad tiene la ventaja de que resume las características de la información ajustada, que es muy útil cuando se maneja una gran cantidad de datos (Chow et al., 1994; Raes, 2010). Las curvas o funciones de distribución de probabilidad mas comunes para el ajuste de datos hidrológicos son: la función normal y lognormal (Aparicio Mijares, 1994).

3.2.3. Preparación de información

Las series de datos de precipitación y requerimientos de riego neto agrupados en décadas se ordenaron en forma de matriz de tal manera de que las filas quedaron definidas por los años y las columnas por las décadas. Las matrices resultantes



son de 22 años por 36 décadas como se muestra en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2: Matriz de precipitaciones agrupadas en décadas.

Mes		Enero			...	Diciembre		
Año	Década	1	2	3	...	1	2	3
	1984		0	0	0	...	46.8	23.2
1985		124.3	57.8	71.9	...	0	129.2	139.2
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2005		123.1	32.4	56.1	...	6.2	0.2	105.7
2006		22.3	51.2	189.6	...	10	19.4	0.2

Los requerimientos de riego neto se determinaron individualmente para cada cultivo en invierno y verano; en este estudio el diseño de los calendarios de riego realizó para una rotación de Maíz-Soya. La rotación fue diseñada para dos años que incluyen cuatro ciclos, en el primer año hay dos ciclos de maíz en invierno y verano respectivamente, y en el segundo año hay una siembra de maíz en invierno y una de soya en verano. Por esta razón se realizaron tres matrices, una matriz para las precipitaciones y dos matrices de los requerimientos de riego neto, una para cada año de la rotación.

3.2.4. Aplicación del análisis de frecuencia

El proceso consistió en analizar cada matriz individualmente, donde se analizaron las 36 columnas por separado, es decir, para cada década durante los 21 años conformando un vector de 21x1. Cada vector de datos se ajustó a una distribución de probabilidad y posteriormente se determinó los valores para las probabilidades de excedencia del 20, 50, 80 %, como se explica en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Matriz de Probabilidades de Excedencia de la Precipitación.

Mes		Enero			...	Diciembre		
P. de Excedencia	Década	1	2	3	...	1	2	3
	20 % - Seco		154	170	228	...	33	64
50 % - Normal		83	87	143	...	7	23	81
80 % - Húmedo		38	44	77	...	1	5	41



3.2.5. Procesamiento de las matrices de requerimiento de riego neto

Los requerimientos de riego neto no se pueden utilizar directamente como la cantidad que se debe aplicar en campo debido a que siempre en un sistema de riego existen pérdidas en el transporte del agua y por el método de aplicación. Estas pérdidas se traducen como eficiencias de transporte y de aplicación, que matemáticamente son coeficientes que se multiplican por el requerimiento de riego neto para aumentar la cantidad y recuperar lo que se pierde; la multiplicación del requerimiento neto por las eficiencias se denomina requerimiento de riego bruto (RRB) (Jensen et al., 1980). La matriz de requerimiento de riego neto se multiplicó por las eficiencias que se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Eficiencias del Sistema de Riego - Fuente: (PROMAS, 2014)

Descripción	Valor
Eficiencia de Transporte	95 %
Eficiencia de Aplicación(aspersión)	80 %

3.2.6. Calendarios de riego

En la Sección 3.2.2 se justificó la elección de los periodos de 10 días para el riego de los cultivos. Para el caso de estudio se necesitan dos calendarios de riego para la rotación, uno para la siembra de maíz en verano y otro para la siembra de soya en el verano del año siguiente. No se realizaron calendarios de riego para las siembras en invierno debido a que las precipitaciones cubrieron los requerimientos de riego de los cultivos. En los calendarios de riego se especificó la fecha de siembra para invierno y verano para cada cultivo (Raes, 2010); entre la siembra de invierno y verano se dejó un intervalo de 1 mes para que se puedan realizar preparación de suelo. Los calendarios de riego especifican el requerimiento de riego bruto en mm para cada escenario determinado por el análisis de frecuencia.

3.3. Desarrollo del modelo de predicción y distribución de riego (MPDR)

El modelo MPDR se encarga de determinar la dosificación de riego expresada como RRB según la precipitación de la década precedente. La dosificación de riego que determina el modelo MPDR debe estar expresada como un caudal en m^3/s , para que se aplique en el análisis del flujo a través del embalse. Para transformar a caudal, el RRB en mm debe ser multiplicado por $10 m^3$ que es el equivalente de 1 mm en 1 ha, por el área cultivada en hectáreas y dividida para 864000 segundos que equivale a 10 días.

3.3.1. Lógica del modelo MPDR

La lógica del modelo es un proceso *condicional* que se basa en la comparación de un dato de entrada con unos valores de referencia. Si el dato de entrada se encuentra entre los rangos definidos por los valores de referencia, el modelo ejecuta una orden previamente establecida.

1. **Datos de Entrada:** Los datos de entrada del modelo es la serie de datos de precipitación agrupados en décadas y la serie de datos de precipitación diarios con sus respectivas fechas.
2. **Valores de Referencia:** Los valores de referencia del modelo están establecidas por las precipitaciones determinadas para las probabilidades de excedencia del 20, 50 y 80 %.
3. **Algoritmo Base del Modelo:** Las decisiones u ordenes que ejecuta el modelo las realiza el *algoritmo base* y resultan de la comparación de los datos de entrada con los valores de referencia y según el escenario determina cuál de los RRB en m^3/s se debe utilizar. El intervalo de tiempo que utiliza el algoritmo base es de tipo diario. El algoritmo base esta diseñado para distribuir agua diariamente en una década y está compuesto por 3 precipitaciones de referencia y 3 RRB expresados en caudal determinados en el análisis de frecuencia; el algoritmo base tiene la siguiente estructura:



Si $P(i) \geq P_{20}(i)$ entonces $Q_R(i + 10) = Q_{80}(i)$

Caso contrario Si $P(i) \geq P_{50}(i)$ entonces $Q_R(i + 10) = Q_{50}(i)$

Caso contrario Si $P(i) \geq P_{80}(i)$ entonces $Q_R(i + 10) = Q_{20}(i)$

- 4. Valores de Salida:** Los valores salida son 10 por cada década y son los RRB expresados en caudal definidos por algoritmo base. Según el número de décadas (nd) contenidas en la serie de precipitaciones de entrada, el número de datos de salida es aproximadamente ($nd * 10$). Los valores de salida son ordenados en un vector de la misma extensión y fechas del vector de precipitaciones diarias.

3.3.2. Conceptualización del modelo MPDR en el caso de estudio

El modelo MPDR tiene como finalidad ser aplicado como un modulo en el modelo de simulación del flujo a través de embalses (Tinoco, 2014), por esta razón, la serie precipitaciones diarias con las que trabaja el modelo MPDR debe tener la misma extensión y estar en el mismo periodo de modelación que los datos de entrada de la simulación de embalses. Este mismo principio se utilizó para el calculo de los valores de referencia del modelo MPDR.

El embalse de Mocache esta diseñado para almacenar agua para un año, donde el riego esta proyectado para periodos de 10 días, por lo tanto, en un año se riega 36 veces al año, 3 veces por cada mes. Como se requiere modelar el embalse de Mocache, el modelo MPDR tiene que distribuir agua durante un año al igual que el embalse, entonces el modelo MPDR debe estar compuesto por 36 algoritmos base debido a que están diseñados para distribuir riego por década.

La rotación tiene una duración de dos años, donde el primer año es para dos ciclos de maíz, y el segundo años para un ciclo de maíz y uno de soya. Teniendo en cuenta la composición de la rotación, el modelo debe estar compuesto por dos partes, una para cada año de rotación lo que significa que el modelo debe estar compuesto por 72 algoritmos base, 36 para el año de maíz-maíz y 36 para el año de maíz-soya. El modelo MPDR para poder definir cuando escoge el año 1 o 2 de la rotación, aplica el mismo algoritmo que en el modelo de simulación del flujo a través de simulación de embalses (Tinoco, 2014), donde el toma como referencia el primer año de la serie de datos, denominándolo como año₀ y mediante la expresión $k = \text{año}(i) - \text{año}_0$ donde, año(i) es el vector de años y m el número de



años, realiza el siguiente proceso:

```
Para i = 1 : m
    k = año(i) - año0
    Si k=0, 2, 4 ...
        Usar año 1
    Caso Contrario Si k=1, 3, 5 ...
        Usar año 2
    Fin Si
Fin Para
```

De esta manera se crea el vector de caudales de riego que determina como se debe distribuir diariamente el agua para riego en la simulación del flujo a través de embalses.

3.4. Modelación de embalses

La base de la modelación de embalses o simulación del flujo a través de embalses es el tránsito agregado de crecientes que consiste en el seguimiento de un caudal a través de un sistema hidrológico, dado un hidrograma de entrada. El tránsito agregado de crecientes es una función dependiente únicamente del tiempo (Chow et al., 1994). Al ser una ecuación dependiente del tiempo, la solución numérica de esta expresión matemática permite realizar una simulación del comportamiento hidrológico de una cuenca a lo largo de series históricas de datos, sin necesidad de un gran costo computacional (Tinoco, 2014; Tinoco et al., 2014).

3.4.1. Representación matemática de la simulación de embalses

El fenómeno del tránsito agregado de crecientes se representa mediante la Ecuación 3.3 que es la ecuación de la continuidad, que expresa la variación de un almacenamiento S con respecto al tiempo como la diferencia de las entradas $I(t)$ y las salidas $Q(t)$ de agua en un sistema hidrológico.

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (3.3)$$

Cuando el sistema hidrológico es un embalse, el almacenamiento está definido por el nivel de agua y por el área del espejo de agua, el volumen almacenado queda



expresado por la Ecuación 3.4 se representa de la siguiente manera:

$$dS = A(H) \times dH \quad (3.4)$$

Remplazando la Ecuación 3.4 en la 3.3 se obtiene la Ecuación 3.5 que representa la ecuación de la continuidad expresada como la variación del nivel de agua con respecto al tiempo igual al cociente entre la diferencia del caudal de entrada con el de salida, y el área del espejo de agua $A(H)$.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{I(t) - Q(t)}{A(H)} \quad (3.5)$$

La expresión 3.5, es una ecuación diferencial de segundo grado en la que se complica la resolución cuando se tiene una gran cantidad de datos, por esta razón se ha vuelto muy común el uso de modelos numéricos que agilitan la solución de estas expresiones matemáticas. La presente metodología de estudio, utilizó en un modelo de tránsito agregado de crecientes desarrollado por (Tinoco, 2014) que se basa en el esquema numérico de Runge-Kutta de segundo orden que brinda una buena combinación de fácil aplicación y una precisión aceptable, que vuelve innecesario la utilización de métodos más complicados y de orden superior (Tinoco, 2014).

3.4.2. Diseño del volumen del embalse

Los embalses se construyen para regulación del caudal de un río con la finalidad de que se pueda almacenar agua para diferentes propósitos además de que sirven para la atenuación de crecientes. Dependiendo del propósito del almacenamiento de agua, el diseño del volumen de almacenamiento debe considerar ciertos niveles de operación que definen en zonas al volumen del embalse y se representan en la Figura 3.3 (Rocha Felices, 1998). Entre los niveles de operación del embalse se tiene los siguientes:

- Nivel máximo de operación o de crecidas (NMAO)
- Nivel normal de operación (NNO)
- Nivel mínimo de operación (NMIO)
- Nivel de solera de toma de fondo (NS)
- Nivel de terreno natural (NT)

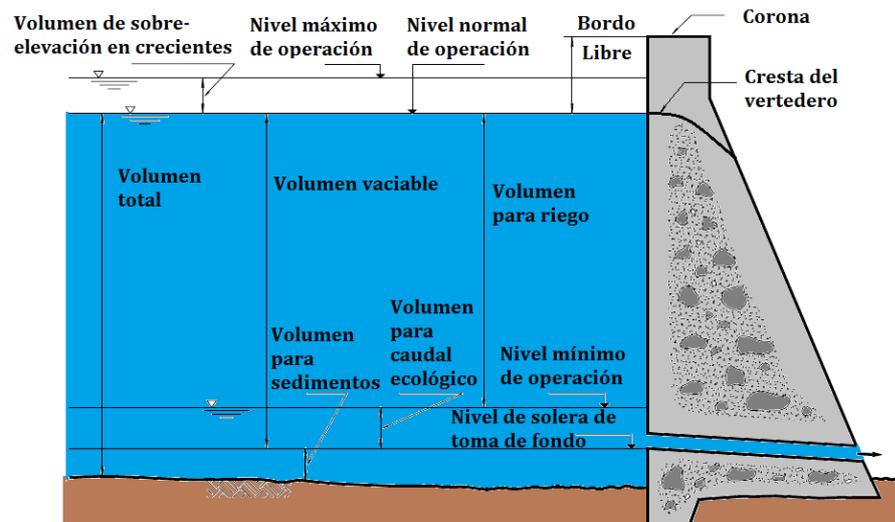


Figura 3.3: Niveles de operación y volúmenes almacenados - *Adaptado de: (Rocha Felices, 1998).*

Estos niveles de operación definen al embalse en zonas o volúmenes según su funcionamiento, y son los siguientes:

- **Volumen de sobre-elevación de crecidas:** Definido entre NMAO y NNO, como su nombre lo indica es el volumen que genera carga en el vertedero de excesos en la presencia de una creciente; se diseña para la atenuación de una creciente para un periodo de retorno determinado.
- **Volumen total:** Esta definido entre el NNO y el NT, para el caso de estudio incluye el volumen de riego, para caudal ecológico y de sedimentos.
- **Volumen vaciable:** Esta determinado por el nivel NNO y el nivel de solera de la toma de fondo, para el caso de estudio esta conformado por el volumen de riego y para el caudal ecológico del río.
- **Volumen para riego:** Esta comprendido entre el NNO y el NMIO. Se diseña para la sumatoria de los requerimientos de riego bruto de un año, con una probabilidad de excedencia del 20%, es decir, para un escenario seco Raes (2010).
- **Volumen para caudal ecológico:** Es el volumen que se encuentra definido por el NMIO y el NS, está destinado para almacenar agua para que sea distribuida como caudal mínimo para la conservación del ecosistema acuático del río.



- **Volumen para sedimentos:** El el volumen comprendido entre el NMIO y el NT, está destinado para acumulación de sedimentos durante la vida útil del embalse, de tal manera que no disminuya el volumen vaciable del embalse Rocha Felices (1998).

3.4.3. Preparación de información para la modelación

Un dato esencial que se utiliza en la modelación son las Curvas Cota-Área-Volumen que relacionan las variables $S(H)$ y $A(H)$ para que la ecuación diferencial pueda ser resuelta (Chow et al., 1994). Las curvas Cota-Área-Volumen están representadas por un conjunto de puntos que se obtienen mediante un sistema de información geográfica (SIG), y se divide en dos grupos: puntos cota-área, puntos cota-volumen. Para que estos conjuntos de puntos sean útiles, se someten a un proceso de ajuste a una curva o función. El caso de estudio se encuentra en la costa Ecuatoriana donde las pendientes son relativamente bajas y cuando el nivel de agua aumenta pocos centímetros, se inunda una gran área. Esta variación del nivel de agua también ocasiona un aumento significativo del volumen almacenado, por esta razón la tendencia de los puntos cota-área y cota-volumen es de tipo potencial. Las unidades de la curva cota-área-volumen están expresadas de la siguiente manera: en metros el nivel de agua, en metros cuadrados el área inundada y en metros cúbicos el volumen almacenado. Las magnitudes de área inundada y volumen almacenado de un embalse, están expresadas en millones de m^2 y m^3 respectivamente, esto significa que al tratar con cantidades muy grandes el ajuste de curvas se debe realizar por rangos para que no haya errores considerables que puedan ser arrastrados a la modelación numérica del embalses.

El volumen de riego se calculó como la sumatoria de los requerimientos de riego bruto del año de mayor consumo de la rotación, en este caso es el primer año de la rotación comprendido por dos ciclos de maíz; el volumen fue de **16.4 millones de m^3** . La cota a la que se debe encontrar el NNO según las curva cota-volumen es de 46.5 m.s.n.m.

3.4.4. Reglas de operación para el embalse de Mocache

Las zonas de operación de un embalse determinan como se debe distribuir los caudales, estas zonas están definidas por los niveles de operación y de la ubicación de las estructuras hidráulicas en la presa (Tinoco, 2014). El embalse se dividió

en 4 zonas y muestran en la Figura 3.4:

	Q_{sp}	Q_R	Q_{ec}	$\uparrow E$
Zona 1 if $H_i \geq H_{crest}$	$Q_{sp}(S(H_i))$	Q_{RTg}	Q_{ec}	H_{crest}
Zona 2 if $H_{pump} \leq H_i \leq H_{crest}$	0	Q_{RTg}	Q_{ec}	H_{pump}
Zona 3 if $H_{outlet} \leq H_i \leq H_{pump}$	0	0	Q_{ec}	H_{outlet}
Zona 4 if $0 \leq H_i \leq H_{outlet}$	0	0	0	

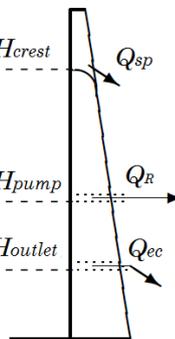


Figura 3.4: Zonas establecidas para la operación del embalse - *Adaptado de: (Tinoco, 2014)*.

- **Zona 1:** Está definida por el NMAO y el NNO; cuando el nivel de agua se encuentra en esta zona, se distribuye el caudal evacuado por el vertedero de excesos Q_{sp} , el caudal de riego demandado Q_{RTg} y el caudal ecológico Q_{ec} .
- **Zona 2:** Está definida por el NNO y el NMIO; cuando el nivel de agua se encuentra en esta zona, se distribuye el caudal de riego demandado Q_{RTg} y el caudal ecológico Q_{ec} .
- **Zona 3:** Está definida por el NMIO y el NS; cuando el nivel de agua se encuentra en esta zona, se distribuye únicamente el caudal ecológico Q_{ec} .
- **Zona 4:** Está definida por el NS y el NT; cuando el nivel de agua se encuentra en esta zona no distribuye ningún caudal, funcionando únicamente como volumen para sedimentos.

3.4.5. Ingreso de datos al modelo de simulación del flujo en embalses

1. Los niveles de operación y las ubicaciones de las estructuras hidráulicas se ingresaron en el modelo como niveles referenciados a la cota del terreno natural, donde el nivel del terreno natural queda como el nivel 0 metros.
2. Los datos de entrada del modelo son las series históricas de datos diarios de: precipitaciones, caudales de la cuenca hidrográfica de Mocache, evapotranspiraciones de referencia y las precipitaciones agrupadas en décadas.



3. Para establecer el volumen del embalse se modificó el código del método Runge-Kutta, donde se ingresó las funciones ajustadas que representan las curvas cota-área y cota-volumen con sus respectivos rangos de aplicación.
4. Para que el modelo sea estable las condiciones iniciales del modelo se analizaron con cuidado para que el primer diferencial de nivel de agua dH/dt calculado por el método numérico Runge-Kutta de un valor positivo y converja el modelo. El análisis realizado a las condiciones iniciales fue comparar el caudal de ingreso al embalse con el de salida para que de una diferencia positiva mínima y que al ser dividida para la área inundada inicial de un valor positivo, para que el calculo de los niveles de agua sucesivos dH y de valores positivos del nivel de agua H pueda continuar.

3.4.6. Datos de salida y procesamiento de los mismos para la obtención de resultados

Los datos de salida que se obtienen de la modelación son vectores de datos diarios de la misma extensión y periodo que los datos de entrada, para el caso de estudio desde 1985 hasta 2006, y son las siguientes:

- El caudal total que sale del embalse Q en m^3/s que es la sumatoria de los caudales Q_{sp} , Q_{ec} y Q_{irrf} .
- Los niveles diarios de agua en el embalse H en m .
- La variación diaria del nivel de agua dH en m .
- El área de inundación $A(H)$ en m^2 .
- El almacenamiento diario $S(H)$ en m^3 .
- El caudal diario evacuado por el vertedero de excesos Q_{sp} en m^3/s .
- La evaporación diaria del embalse E en mm .
- El caudal ecológico diario Q_{ec} en m^3/s .
- El caudal evacuado al río Mocache Q_{river} que es la suma de Q_{ec} más Q_{sp} en m^3/s .
- La demanda de caudal de riego diario Q_{irro} en m^3/s .



- El caudal de riego diario abastecido $Q_{irr,f}$ en m^3/s .

La modelación de embalses se realizó para dos casos: a) utilizando el modelo MPDR y b) para el procedimiento normal de diseño, considerando condiciones secas de precipitación. Con los vectores obtenidos de las modelaciones se creó una base de datos para el caso a) y b) para obtener resultados promedio y acumulativos de tipo diario, mensual y anual mediante un proceso estadístico.



Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1. Resultados de la simulación de los cultivos

Los parámetros analizados de la simulación de cultivos son: la productividad del agua según la cosecha expresada como kg de cosecha producida por m^3 de agua evapotranspirada, la cosecha anual ton/ha y la transpiración mm . Los datos diarios obtenidos de la simulación y fueron analizados en términos anuales, es decir, para cada ciclo de siembra en un año durante los 21 años de simulación. Los análisis se realizaron para cada cultivo, entonces el primer análisis fue individual para el maíz de invierno, maíz de verano y soya de verano. También se analizó para cada año de la rotación, el primer año comprendido por un ciclo de maíz en invierno y uno en verano, y el segundo año por un ciclo de maíz en invierno y uno de soya en verano; y finalmente se analizó para los dos años de rotación, durante los 21 años de simulación.

4.1.1. Comportamiento del maíz en invierno

El comportamiento de la cosecha del maíz en invierno durante los 21 años de simulación es muy variable con valores que oscilan entre 11.34 y 14.63 ton/ha , con una cosecha media anual de 12.85 ton/ha ; como se puede observar en la Figura 4.1.

La simulación de maíz en invierno, es muy importante para entender la disminución de la transpiración total en la cosecha anual por rotación y en la rotación propiamente dicha. La transpiración disminuye debido a que en esta época existe un contenido de humedad excesivo en el suelo por las grandes precipitaciones que se presentan. El exceso de precipitación provoca *estrés por empozamiento de agua* que evita el ingreso de oxígeno al suelo inhibiendo la respiración del cultivo Allen

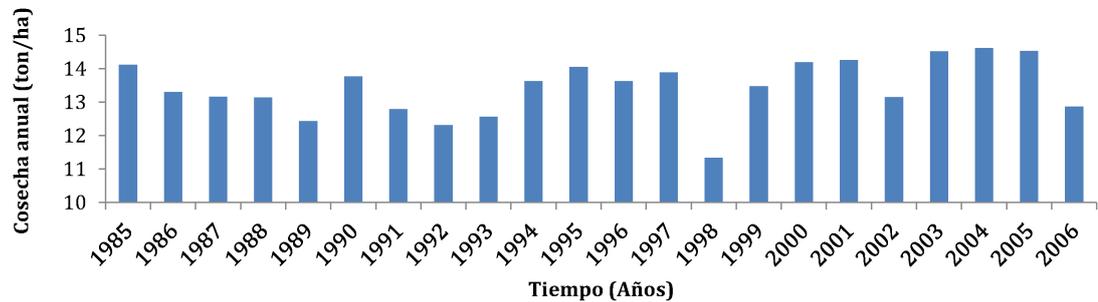


Figura 4.1: Cosecha anual del maíz de invierno.

et al. (2006). Este estado se denomina *punto anaerobio* (Raes et al., 2009a) y se alcanza cuando el contenido de humedad del suelo está entre la saturación y la capacidad de campo, y si se mantiene así por algunos días; el número de días de empozamiento de agua y el punto anaerobio depende del tipo de cultivo.

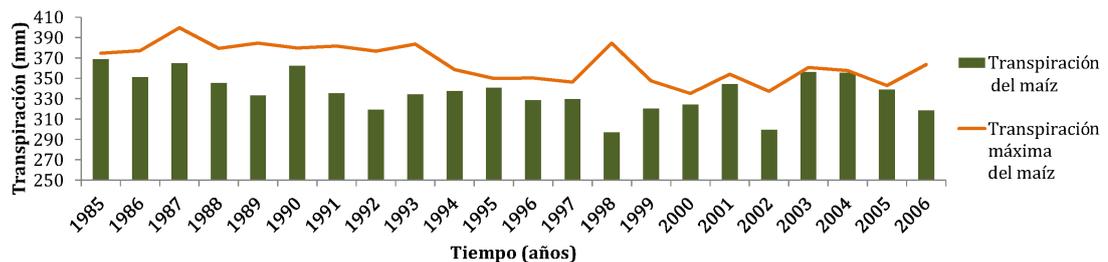


Figura 4.2: Transpiración del maíz de invierno.

El modelo AquaCrop considera un coeficiente reductor por empozamiento del agua que afecta directamente a la transpiración del cultivo Tr . Como se observa en la Figura 4.2 la transpiración del cultivo disminuye; según el fundamento teórico del modelo, la transpiración del cultivo es fundamental para el cálculo de la biomasa B , entonces si la biomasa disminuye también lo hará la cosecha Y , tal como representa la Figura 4.2 y 4.3.

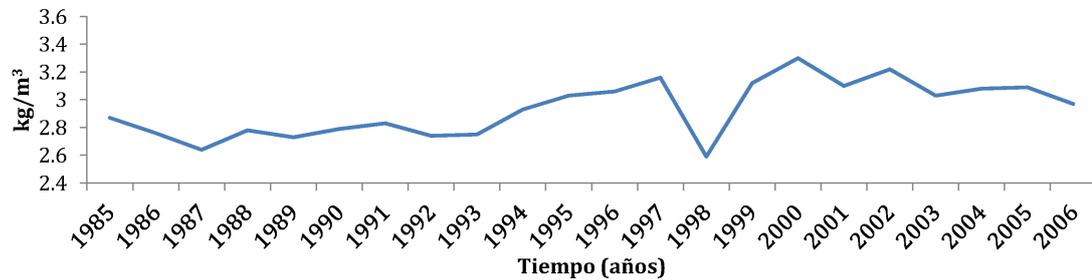


Figura 4.3: Productividad del agua según la cosecha del maíz en invierno.

La Figura 4.3 expresa una relación entre los kg de cosecha producidos por los m^3 transpirados, se puede ver que en el año 1998 se tiene el valor mas bajo de la simulación con $2.59 kg/m^3$ debido a las grandes precipitaciones del fenómeno del niño, que provocaron un gran estrés en el cultivo reduciendo mucho la transpiración como se observa en la Figura 4.2.

4.1.2. Comportamiento del maíz y soya en verano

El maíz y la soya en verano se desarrollan mejor, siempre y cuando sus requerimientos hídricos sean abastecidos; el comportamiento de la cosecha a lo largo de los 21 años de simulación es creciente como se puede observar en la Figura 4.4 y A.2. El comportamiento creciente de los dos cultivo se debe al aumento de la concentración CO_2 , pero el aumento de la cosecha solo se puede dar en cultivos tipo $C3$ como el caso de la soya y no en cultivos tipo $C4$ como lo es el maíz (Jaggard et al., 2010).

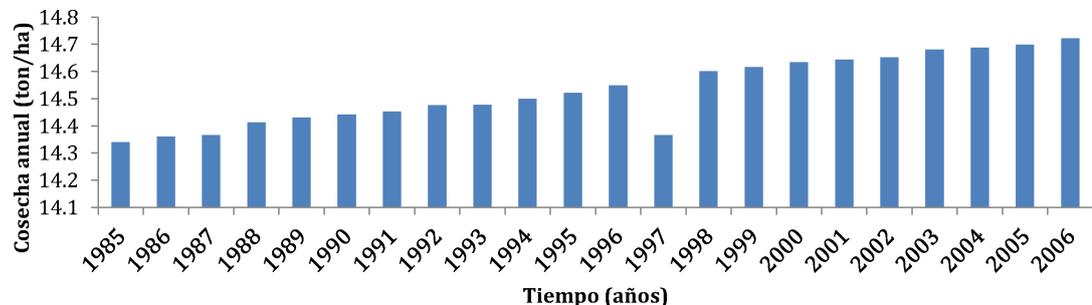


Figura 4.4: Cosecha anual del maíz de verano.

Si se observa la Figura 4.5, el maíz alcanza la transpiración máxima , lo que quiere decir que al aplicar la cantidad necesaria establecida por los calendarios

de riego, el cultivo no sufre estrés por empozamiento de agua, por lo tanto no disminuye la transpiración. En el año 1998 existe una excepción, donde hay una disminución de la transpiración por estrés por empozamiento provocado por las fuertes lluvias ocasionadas en verano por el fenómeno del niño. Con respecto a las transpiraciones de la soya, este cultivo muestra un comportamiento mas resistente al estrés por empozamiento de agua como se puede observar en la Figura A.3.

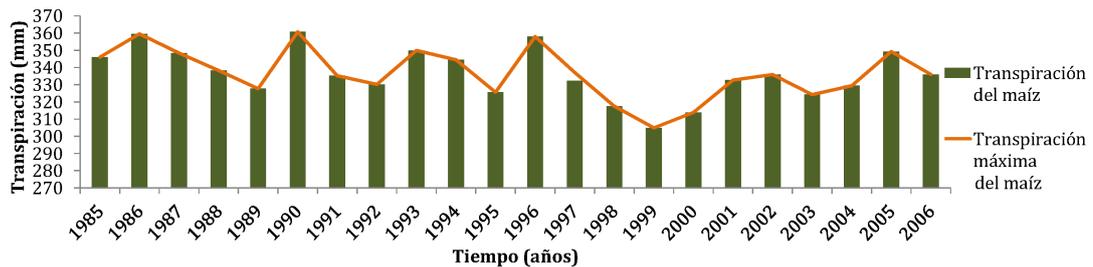


Figura 4.5: Transpiración del maíz de verano.

En la Figura 4.6 y A.4 los dos cultivos en el año 1999 presentan una de las mayores relaciones entre los kg de cosecha producidos por los m^3 transpirados, donde se puede observar que la cantidad cosechada ha sido muy grande en relación con el agua transpirada representando el comportamiento ideal de un cultivo. El año 1999 se puede clasificar como un año con bajas precipitaciones y bajas demandas atmosféricas según los resultados.

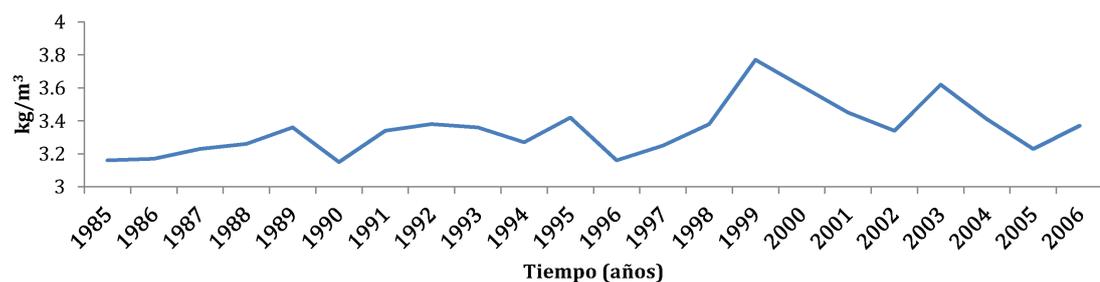


Figura 4.6: Productividad del agua según la cosecha del maíz en verano.

4.1.3. Comportamiento anual y de la rotación

El comportamiento por año de rotación y de la rotación completa, se explica por el comportamiento individual de cada cultivo según la época en la que se siembre, también se justifica el hecho de que haya una disminución en la transpi-



ración por las siembras en invierno.

La variación anual de la cosecha tiene un comportamiento cíclico como se muestra en la Figura A.5 debido a que el primer año de la rotación está compuesto por dos ciclos de maíz, por ende va a tener una mayor cosecha que el segundo año de la rotación que esta comprendido por un ciclo de maíz y uno de soya. El año de mayor cosecha para los dos ciclos de maíz es el 2004-2005 con un valor de 29.23 *ton/ha* y el año de mayor cosecha para el ciclo de maíz y soya es el 2003-2004 con un valor de 18.17 *ton/ha*.

El comportamiento de la cosecha por rotación expresado en la Figura A.8 tiene un comportamiento más estable donde la tendencia creciente de las siembras en verano es compensado por el comportamiento variable de las siembras en invierno; la rotación con mayor cosecha es en el periodo 2004-2006 con un valor de 45.62 *ton/ha* y la rotación de menor cosecha es en el periodo 1998-2000 que incluye el año de menor cosecha para los cultivos por efectos de estrés por empozamiento de agua causado por el fenómeno del niño en 1998. El la tendencia creciente de la relación entre los *kg* de cosecha producidos y los m^3 de agua transpirada en la Figura A.10, indica que se produce mayor cantidad de cosecha y se transpira menos agua, siendo el comportamiento ideal que se espera en la producción de la cosecha.

4.2. Resultados del análisis de frecuencia para la creación de calendarios de riego

Los calendarios de riego se crearon de los requerimientos de riego calculados en la simulación del cultivo y de las precipitaciones luego de haber sido agrupados en periodos de 10 días.

4.2.1. Precipitación según su probabilidad de excedencia

Las precipitaciones para las probabilidades de excedencia del 20, 50 y 80 % representan un escenario húmedo, normal y seco respectivamente, y están representados por los valores que se obtuvieron del análisis de frecuencia en la Figura A.11. También se puede observar claramente la diferencia entre la ocurrencia de la precipitación en el año y el volumen precipitado que definen las etapas de

invierno y verano de la zona de estudio.

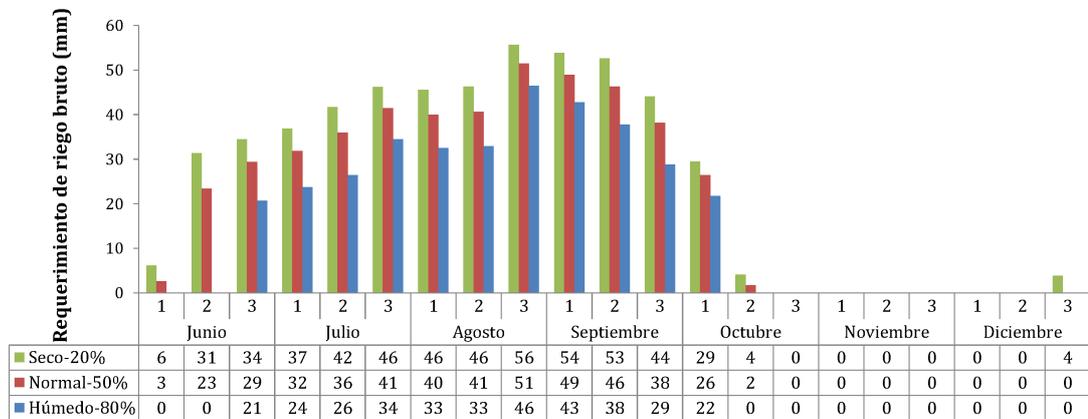


Figura 4.7: Calendario de riego para maíz.

De la misma manera que las precipitaciones, los requerimientos de riego bruto se presentan en la Figura 4.7 y 4.8 expresados como calendarios de riego para condiciones secas, normales y húmedas.

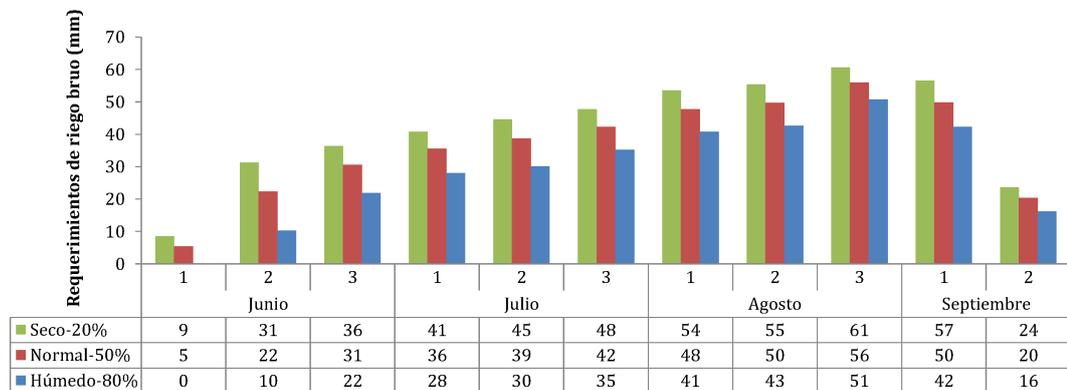


Figura 4.8: Calendario de riego para soya.

Los calendarios de riego solo existen para las siembras de verano debido a que las precipitaciones de la época invernal abastecen las demandas hídricas de los cultivos.

4.3. Resultados de la modelación de embalses con el modelo MPDR

El caudal de riego medio diario que determinó el modelo MPDR según las precipitaciones de la década precedente se muestra en la Figura 4.7. Se puede observar que las precipitaciones desde enero a mayo son lo suficientemente altas para abastecer las necesidades del maíz en invierno, ya que exceden en más de 5 veces el mayor requerimiento de riego de los cultivos. Estos datos de precipitación sirven para corroborar el estrés que se produce por empozamiento de agua en la Sección 4.1.1.

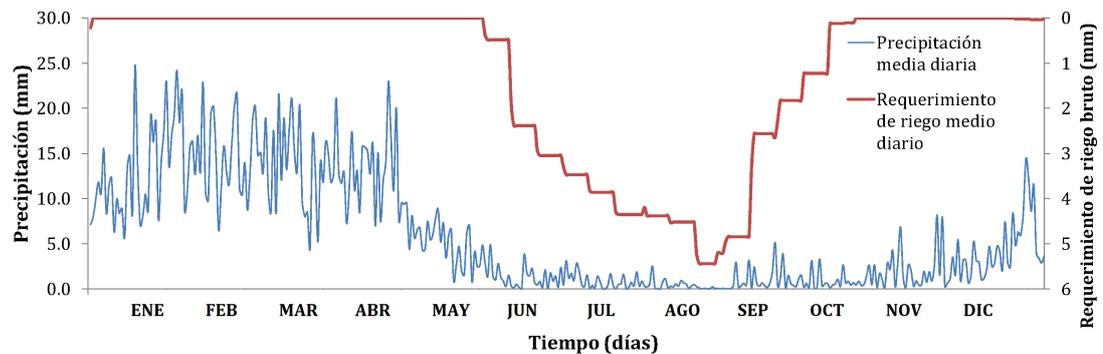


Figura 4.9: Requerimiento de riego y precipitaciones.

4.3.1. Comportamiento anual del embalse

El comportamiento del nivel de agua del embalse a lo largo del año se puede observar en la Figura 4.10; desde el mes de enero hasta mayo, el embalse se llena aprovechando la escorrentía superficial de la cuenca hidrográfica de Mocache representado por I_o como se expresa en la Figura 4.11. La escorrentía de la cuenca I_o en los primeros días de enero tiene un caudal de $0.78 \text{ m}^3/\text{s}$ y por el aumento de precipitaciones llega a su caudal máximo en la primera semana de febrero con $2.90 \text{ m}^3/\text{s}$, se mantiene con caudales variables de 2 a $2.79 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta finales del mes de abril, donde el embalse alcanza su almacenamiento máximo y empieza a evacuar agua por el vertedero de excesos con caudales hasta de $Q_{sp}=2.1 \text{ m}^3/\text{s}$. La escorrentía empieza a disminuir hasta $0.68 \text{ m}^3/\text{s}$ en los últimos días de mayo cuando finaliza el invierno.

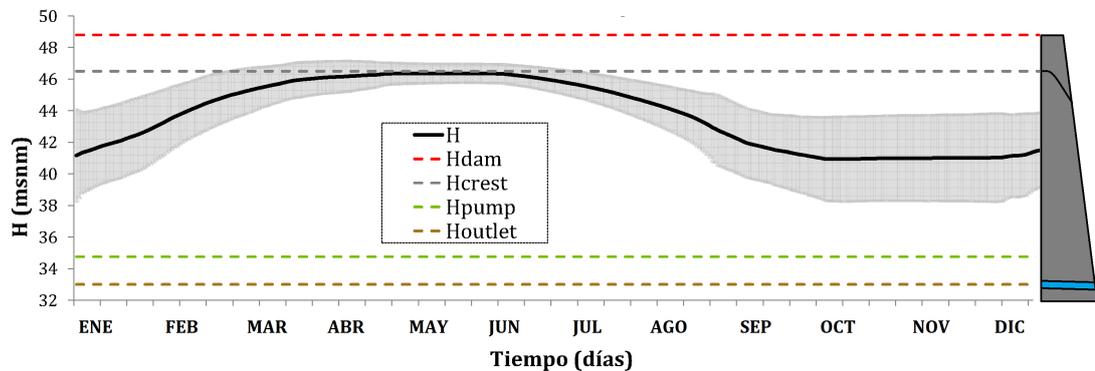


Figura 4.10: Niveles medios diarios de agua en el embalse.

En junio, cuando empieza la época de verano, el caudal de escorrentía empieza a disminuir. De la misma manera que la escorrentía, el almacenamiento del embalse también disminuye por la distribución del caudal ecológico Q_{ec} y el caudal de riego Q_R . El caudal de riego que inicia con $0.85 \text{ m}^3/\text{s}$ y aumenta cada 10 días hasta la época de mayor demanda que es a mediados de agosto con un caudal de riego de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ y desde agosto a inicios de octubre disminuye a $0.56 \text{ m}^3/\text{s}$. En octubre la escorrentía disminuye hasta $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$; aguas abajo de la presa este caudal es abastecido por el caudal ecológico Q_{ec} distribuido por el embalse. El caudal de ingreso al embalse representado por I compuesto únicamente por I_o y el caudal de salida del embalse compuesto por $Q = Q_{sp} + Q_R + Q_{ec}$ se mantienen con valores pequeños hasta de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta que empiecen las precipitaciones a mediados del mes de diciembre.

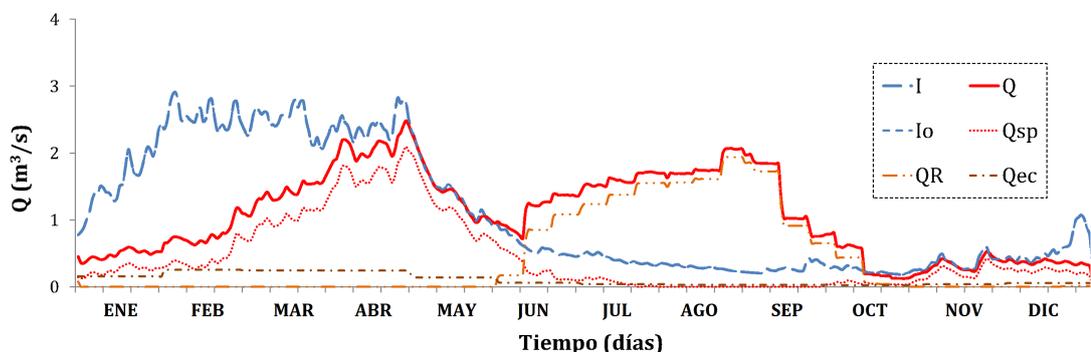


Figura 4.11: Desglosamiento de caudales de entrada y salida del embalse.

Existe un componente más del caudal de salida del embalse que es la evaporación de agua del embalse. Es un parámetro muy importante ya que es proporcio-

nal al área inundada, y alcanza un valor máximo de $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de abril cuando el nivel de agua embalse está entre el nivel normal de operación y el nivel máximo de operación dando como resultado la mayor área de inundación, como se muestra en la Figura 4.12.

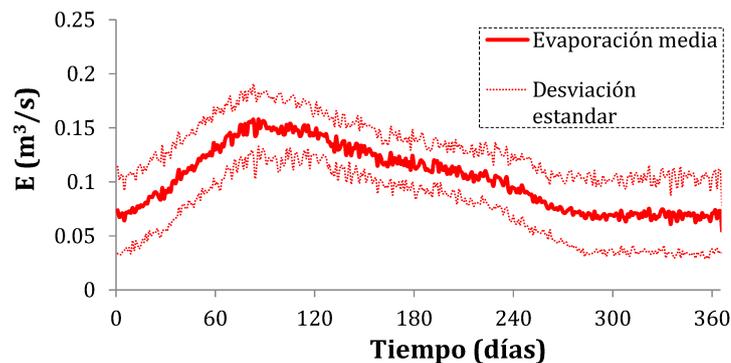


Figura 4.12: Evaporación del embalse de Mocache.

4.3.2. Abastecimiento de riego

Para poder visualizar los resultados en el abastecimiento de riego se comparó los resultados de riego obtenidos de dos simulaciones: la primera simulación se realizó con el modelo MPDR y la segunda simulación se realizó mediante el procedimiento normal de diseño, es decir, para un escenario de riego seco con un requerimiento de riego bruto para una probabilidad de excedencia de 20 % para cada década. Para la simulación con el modelo MPDR existe un déficit del 0.55 % del caudal de riego en el mes de octubre, mientras en la simulación para las condiciones secas se tiene un déficit de caudal de riego del 3.28 % en septiembre y un 10 % en octubre como se muestran en las Figuras 4.13 y 4.14.

La comparación entre simulaciones también se realizó para el volumen anual de riego durante los 21 años de simulación como se muestra en la Figura 4.15. Como el volumen del embalse fue diseñado para los requerimientos de riego para un escenario seco, el volumen del embalse para la simulación para condiciones secas si abastece la demanda anual casi en un 100 % de los años, pero existe un déficit de volumen de riego a en el año 2005 de 23.4 % mientras que para el volumen de riego obtenido con el modelo MPDR el déficit es del 0.8 % en el mismo año. En el año 1985, el primer año de simulación para los dos casos, ninguna de los dos simulaciones cubre la demanda de riego debido a que el modelo tiene que estabilizarse en los primeros pasos y el embalse tiene que llenarse.

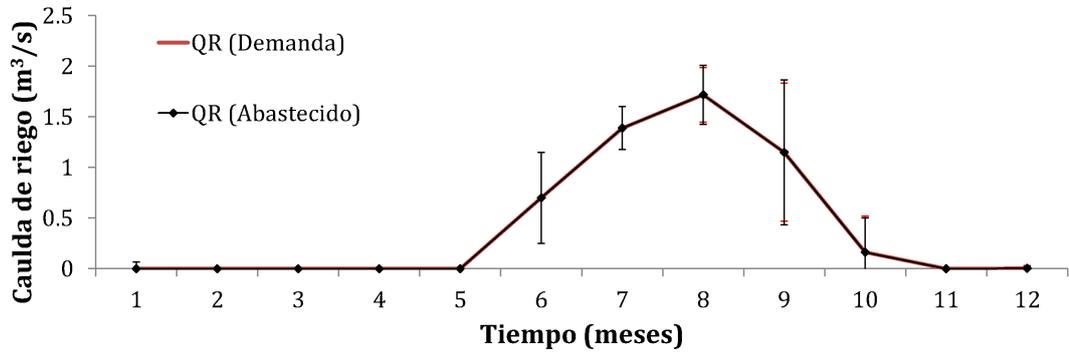


Figura 4.13: Simulación con el modelo MPDR.

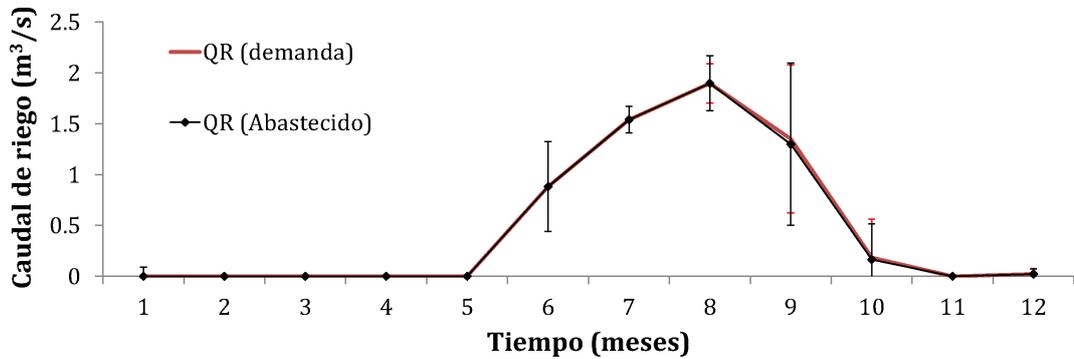


Figura 4.14: Simulación para condiciones secas.

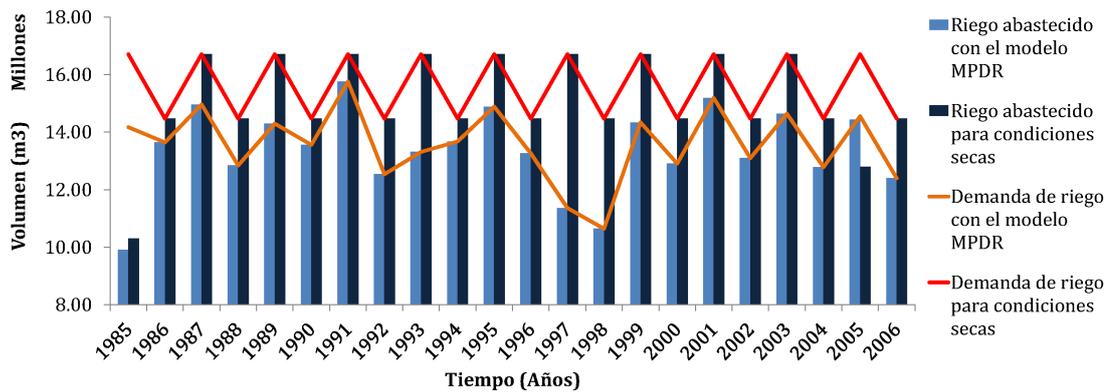


Figura 4.15: Volumen anual de riego.

El de volumen de riego obtenido de la simulación para condiciones secas tiene un comportamiento cíclico debido a que la demanda de riego para cada año de la rotación es fija, a diferencia de la demanda obtenida por el modelo MPDR que

considera la variabilidad de las precipitaciones, por esta razón cada año tiene una demanda de riego distinta y menor a la calculada por la simulación para condiciones secas. Este comportamiento se puede explicar mediante el año 1998 cuando se dio el fenómeno del niño; las grandes precipitaciones de este año abastecieron en mayor cantidad el requerimiento de agua de los cultivos, disminuyendo notablemente el volumen anual de riego.

4.3.3. Caudal Ecológico

La simulación con el modelo MPDR asegura la distribución del caudal ecológico mínimo que es igual al 10 % del caudal medio mensual (Tinoco, 2014) durante los 21 años de simulación como se puede ver en la Figura 4.16. En la época de invierno no existe problema alguno con la distribución del caudal ecológico ya que es abastecido por el caudal evacuado por el vertedero de excesos con valores hasta de $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$. En la época de verano el caudal ecológico abastecido es el mínimo requerido como se puede ver en la Figura A.12

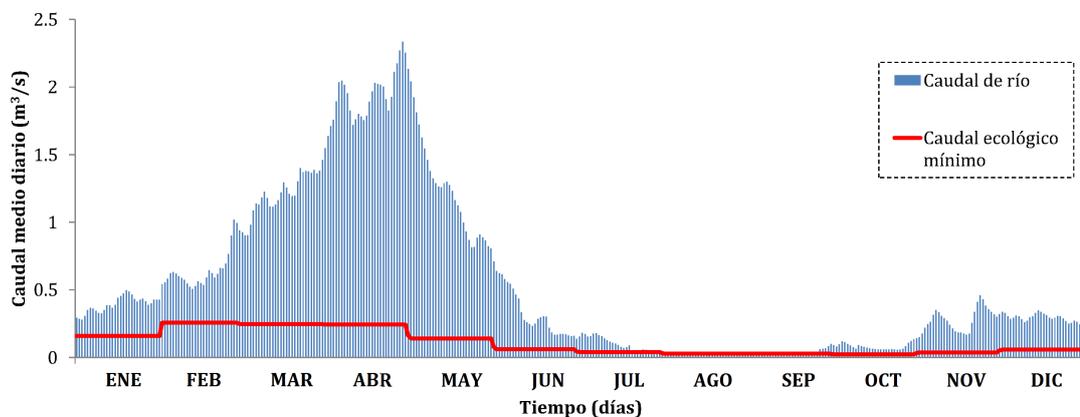


Figura 4.16: Caudal ecológico medio diario.

Capítulo 5

Conclusiones

Desde un punto de vista general, los resultados muestran que el uso del modelo MPDR optimiza el uso del agua que es la finalidad del presente estudio. A continuación se presentan los puntos mas importantes que ayudaron al cumplimiento de este objetivo:

- a) La modelación del embalse de Mocache con la aplicación del modelo MPDR abastece la demanda de riego planificada durante la época seca en un 100 % en 4 de los 5 meses y únicamente en el mes de octubre se cubre el 99.45 % de la demanda que representa el 99.9 % de la demanda de riego anual, a diferencia de la modelación para condiciones secas que presenta un déficit mayor con el 3.28 % en septiembre y 10 % en octubre, que representa el 97.34 % de la demanda de riego anual. Esta deficiencia de volumen de riego en septiembre y octubre puede provocar condiciones de estrés hídrico en los cultivos generando disminución en la cosecha. A pesar de que existe una diferencia de en los porcentajes de abastecimiento de riego, los porcentajes alcanzados son considerablemente altos debido a que la diferencia en las metodologías está en la utilización del modelo MPDR, es decir, que la simulación con el modelo MPDR determina cuanto regar según la precipitación. Las dos modelaciones de embalses aplican requerimientos de riego calculados con AquaCrop, lo que indica que el calculo de requerimientos de riego mediante la simulación de cultivos con datos diarios da una mejor similitud a los requerimientos reales del cultivo, evitando que se sobrestime o se subestime las necesidades del cultivo.
- b) Además de la optimización del uso agua con la simulación de cultivos, la determinación de escenarios para lluvia y cantidades de riego mediante el análisis de frecuencia permite que el modelo MPDR considere la variación climática para definir la cantidad de riego según la precipitación, de esta manera si la

precipitación abastece con un cierto porcentaje de agua al cultivo se utiliza menos agua del embalse.

- c) En los 21 años de simulación se garantiza el caudal ecológico mínimo a lo largo del año, en especial en la época seca, asegurando que no se interrumpa el flujo en el río de tal manera que no altere el ecosistema acuático del río.
- d) En la modelación de embalses se pudo ver que la estabilidad del modelo depende mucho de las condiciones iniciales que se establecen antes de iniciar la modelación. Estas condiciones se refiere al primer calculo de la variación del nivel de agua del embalse con respecto al tiempo en donde interviene la diferencia entre del caudal de entrada y el de salida, dividida para el área de inundación; se debe controlar que el primer valor calculado sea positivo para que converja el modelo.
- e) La operación de los embalses del proyecto PACALORI con el modelo MPDR puede dar como resultado que se utilice menos agua para las áreas de riego diseñadas, lo que significa que el volumen de riego que almacenan los embalses puede abastecer áreas mas grandes aumentando la producción de los agricultores.
- f) Los resultados obtenidos de la modelación del embalse de Mocache con el modelo MPDR se pueden comparar con una modelación realizada con los requerimientos de riego calculados oroginalmente para el proyecto PACALORI por el (PROMAS, 2015) para cuantificar el beneficio del modelo.

5.1. Limitaciones del estudio

Para el desarrollo del estudio se hicieron algunas simplificaciones, las cuales si se consideraban se alejaban del objetivo general que era el desarrollo del modelo. Estas simplificaciones tienen que ver con la simulación de los cultivos y se asumió condiciones óptimas de fertilización, en el área de riego de Mocache solo existe el tipo de suelo Mollisol, y la simulación se realizó para maíz y soya por la falta de cultivos en AquaCrop. Estas simplificaciones deberán ser consideradas el momento de aplicar el modelo MPDR para un caso práctico.



5.2. Próximas investigaciones según los resultados obtenidos

Según (Jaggard et al., 2010) los cultivos de tipo C4 no pueden aumentar la cosecha con el aumento de la concentración de CO_2 únicamente los cultivos de tipo C3, y el comportamiento observado para el maíz modelado en AquaCrop para la época de verano es creciente y no concuerda con la bibliografía citada. Para un próximo estudio se recomienda observar este comportamiento de los cultivos C4 con la utilización de modelos de simulación de cultivos como *CropSyst* o *APSIM*.



Bibliografía

- Allen, R. G. et al. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, volume 56. Food & Agriculture Org.
- Aparicio Mijares, F. J. 1994. Fundamentos de hidrología de superficie.
- Celi Contreras, M. V. y Vélez Arcentales, M. A. 2013. Análisis de escenarios y estudio de un balance hídrico con aplicación al embalse MACUL 1 empleando el programa HEC-ResSim.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill, Bogotá.
- INEC 2010. Resultados del censo 2010 de población y vivienda en el Ecuador. Fascículo Provincia Los Ríos.
- INEC 2012. Canton Mocache Proyecto: “ Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional Escala 1 : 25000 ” Componente 5 : “ Socioeconómico y cultural ”.
- INEC 2013. Datos Estadísticos Agropecuarios.
- Jaggard, K. W., Qi, A., y Ober, E. S. 2010. Possible changes to arable crop yields by 2050. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences, 365(1554):2835–2851.
- Jensen, M. E. et al. 1980. Design and operation of farm irrigation systems.
- Lara Ledesma, S. E. 2009. Evaluación de varios Bioestimulantes Foliare en la producción del Cultivo de Soya (*Glycine max L.*), en la zona de Babahoyo Provincia de Los Ríos.



- Molina, M. 2010. Evaluación de seis híbridos de maíz amarillo duro; INIAP H-601, INIAP H 553, HZCA 315, HZCA 317, HZCA 318, Austro 1, frente a dos testigos, AGRI 104 Y DEKALB DK 7088, sembrados por el agricultor local, en San Juan - Cantón Pindal - Provincia de Loja.
- Prefectura de Los Ríos 2012. Plan de Ordenamiento Territorial de la Provincia de Los Ríos.
- PROMAS 2013. El tomo III del estudio de prefactibilidad del proyecto PACALORI incluye los capítulos : 1 Climatología , 2 Hidrología y 3 Sedimentología.
- PROMAS 2014a. Factibilidad: Informe de Agrología, Plan de aprovechamiento y control del agua en la provincia de los Ríos.
- PROMAS 2014b. Informe Ejecutivo: Plan de aprovechamiento y control del agua de la provincia de Los Ríos, estudio de factibilidad.
- Raes, D. 2010. Irrigation Agronomy.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T., y Fereres, E. 2009a. Aquacrop reference manual. fao.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., y Fereres, E. 2009b. AquaCropThe FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal*, 101(3):438.
- Reca, J., García-Manzano, A., y Martínez, J. 2015. Optimal pumping scheduling model considering reservoir evaporation. *Agricultural Water Management*, 148:250–257.
- Rocha Felices, A. 1998. Introducción a la Hidráulica Fluvia.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., y Raes, D. 2012. FAO 66 - Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., y Fereres, E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, 101(3):426.
- Tinoco, V. 2014. Evaluation of Reservoir Operation Strategies for the Macul Basin - Ecuador.



Tinoco, V., Willems, P., Wyseure, G., y Cisneros, F. 2014. Modelamiento de operación de embalses para el proyecto integral de riego en la cuenca del río Macul.

Verplancke, H. 1995. Soil Physics.

Yusuf, K. O. 1999. Determination of Optimum Temperature and Moisture Content for Crop.



Anexo A

Figuras de Resultados

Curvas cota-área-volumen

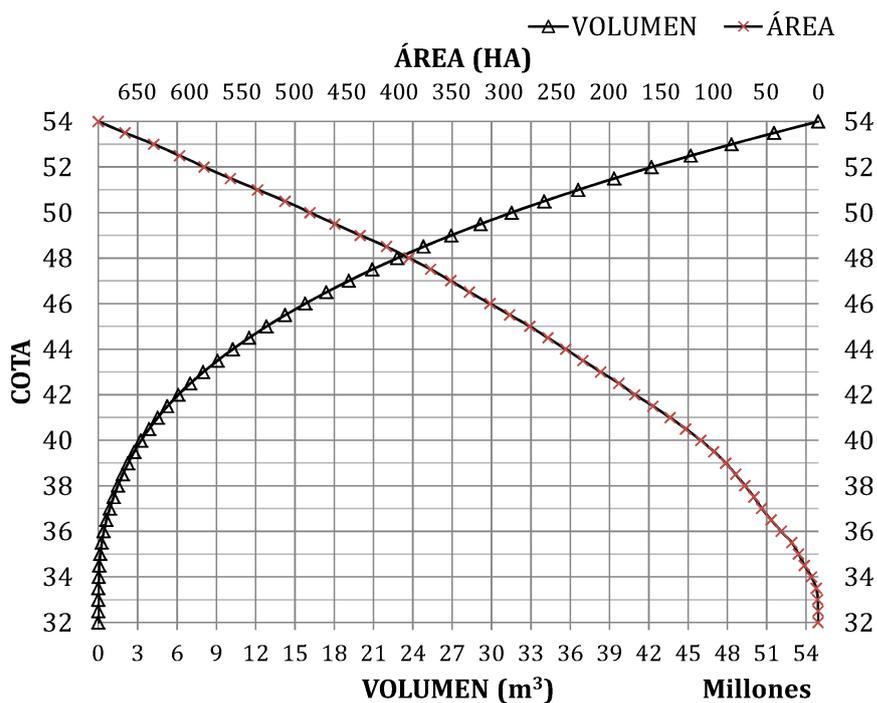


Figura A.1: Curvas Cota-Área-Volumen del embalse de Mocache.

Resultados de la simulación de la siembra de soja en verano

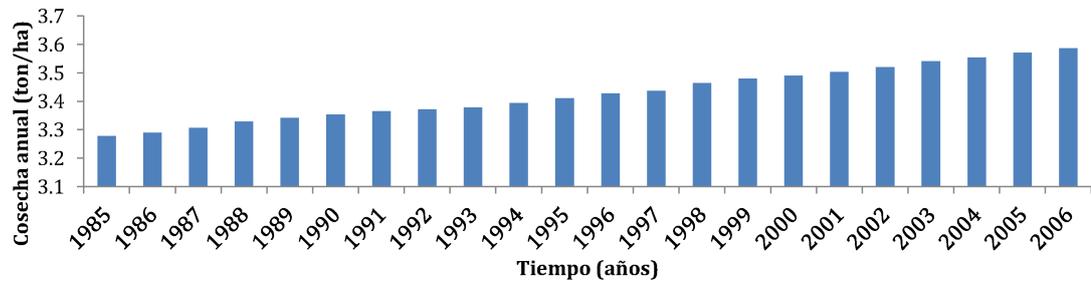


Figura A.2: Cosecha anual de la soja de verano.

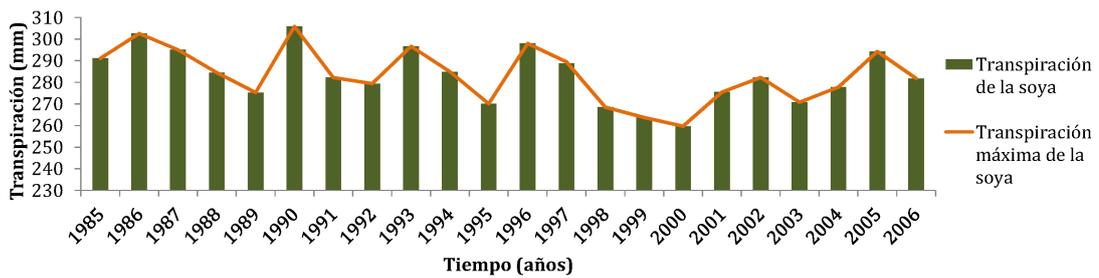


Figura A.3: Transpiración de la soja de verano.

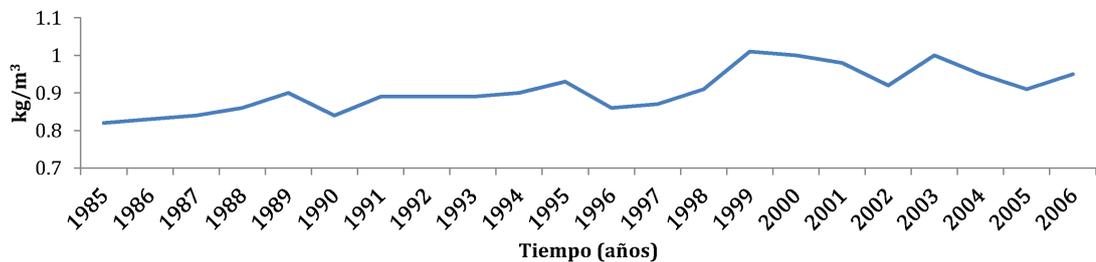


Figura A.4: Productividad del agua según la cosecha de la soja de verano.

Resultados por año de rotación

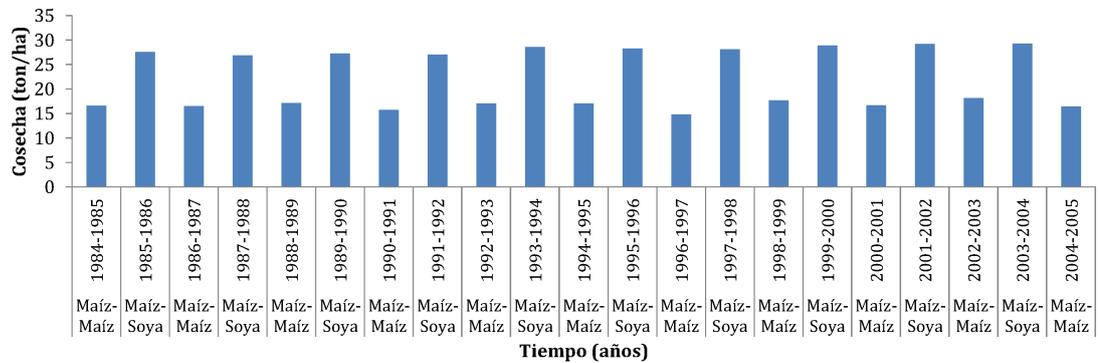


Figura A.5: Cosecha por año rotación.

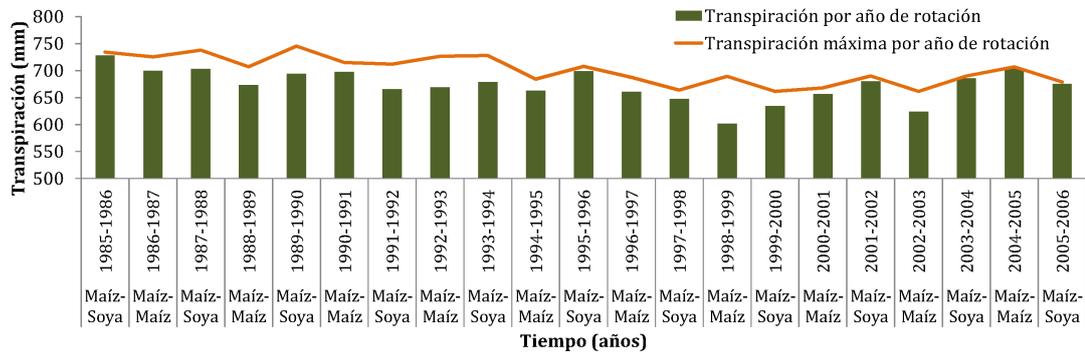


Figura A.6: Transpiración por año rotación.

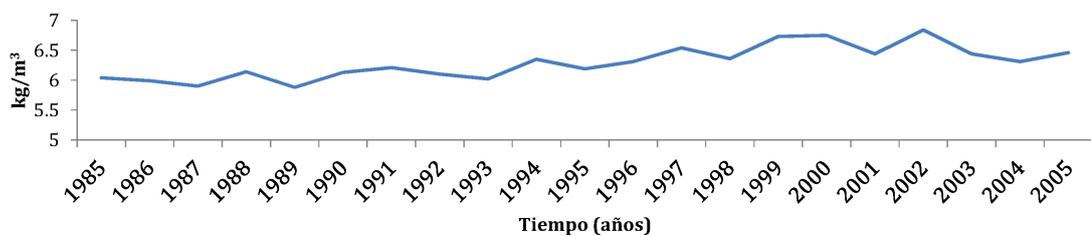


Figura A.7: Productividad del agua según la cosecha por año rotación.

Resultados por rotación

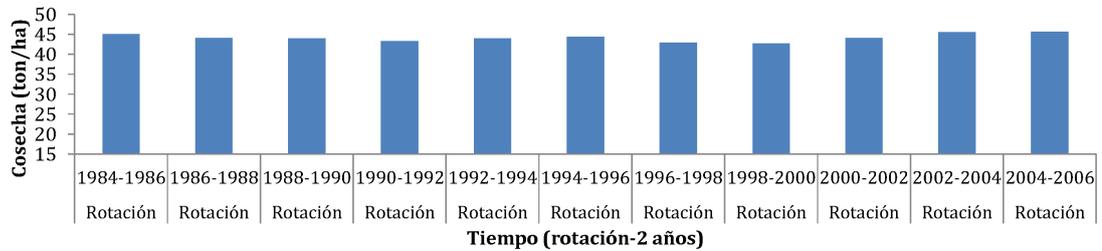


Figura A.8: Cosecha anual por rotación.

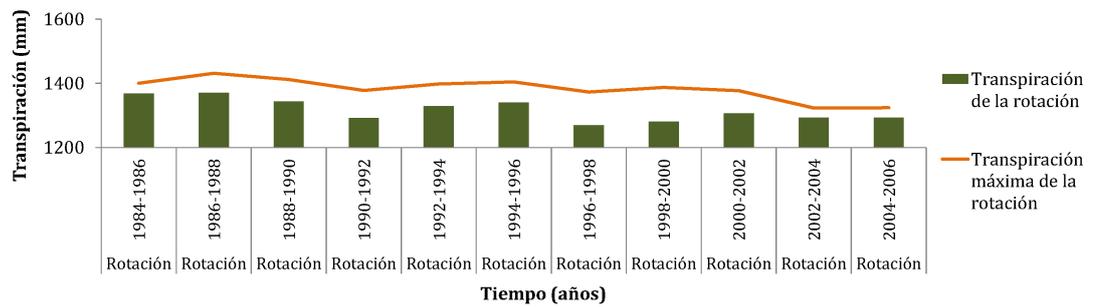


Figura A.9: Transpiración por rotación.

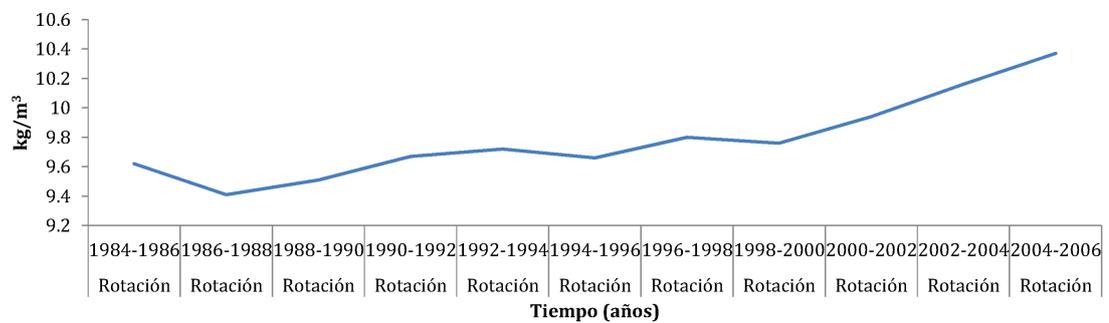


Figura A.10: Productividad del agua según la cosecha por rotación.

Escenarios de Precipitación

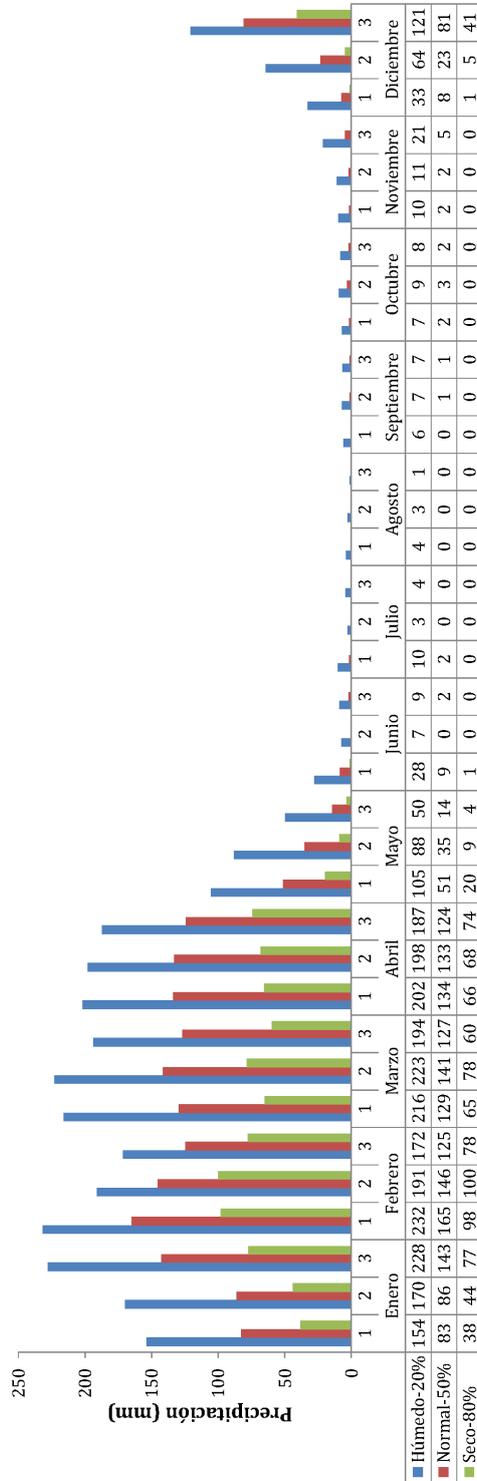


Figura A.11: Precipitaciones para un escenario húmedo, normal y seco.

Caudal Ecológico

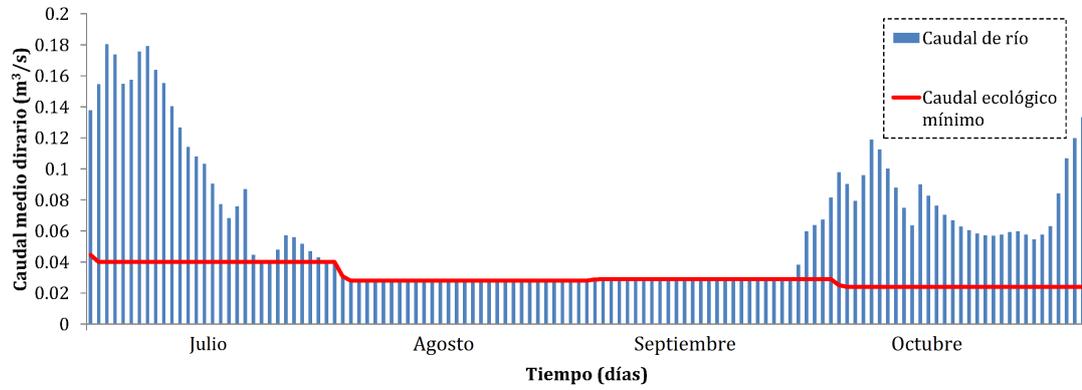


Figura A.12: Caudal ecológico medio diario en verano.